

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PUNÇÃO EM LAJES LISAS
DE CONCRETO ARMADO COM VARIAÇÃO DA
ANCORAGEM DA ARMADURA DE PUNÇÃO**

DJALMA DA COSTA SOUZA

ORIENTADOR: GUILHERME SALES SOARES DE A. MELO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

BRASÍLIA / DF: JULHO / 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE
CONCRETO ARMADO COM VARIAÇÃO DA ANCORAGEM DA
ARMADURA DE PUNÇÃO**

DJALMA DA COSTA SOUZA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

GUILHERME SALES SOARES DE AZEVEDO MELO, *Ph.D* (UnB)

(Orientador)

MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA, *D.SC* (UnB)

(Examinador interno)

HENRIQUE JORGE NERY DE LIMA, *M.Sc* (UnB)

(Examinador interno)

RODOLFO DE AZEVEDO PALHARES, *Eng.* (UFERSA)

(Examinador interno)

DATA: BRASÍLIA/DF, 20 de Julho de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, DJALMA DA COSTA

Análise Experimental da Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Variação da Ancoragem da Armadura de Punção [Distrito Federal] 2018.

xvi, 128 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| 1. Punção | 2. Lajes lisas |
| 3. Armadura de Punção | 4. Análise experimental |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (BACHAREL) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, D.C. (2018). Análise Experimental da Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Variação da Ancoragem da Armadura de Punção. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Djalma da Costa Souza

TÍTULO: Análise Experimental da Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Variação da Ancoragem da Armadura de Punção.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil Ano: 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Djalma da Costa Souza
Ql.: 03, Conjunto: E, Casa 26
CEP: 71590579 –Itapoã / DF – Brasil
E-mail: alunocivilunb@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo ao longo de toda minha vida.

Agradeço a minha família pelo apoio que sempre me ajudou.

Agradeço ao meu orientador de projeto final Guilherme Sales Melo pela presente pesquisa.

Agradeço ao chefe do laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília Marcos Honorato de Oliveira, pelo apoio dado a esta pesquisa.

Agradeço aos colegas do curso de graduação da UnB, que sempre me ajudaram.

Agradeço a minha orientadora de PIBIC Valdirene Maria Capuzzo.

Agradeço ao Henrique J. Nery de Lima pelas diversas correções que fez a este trabalho.

RESUMO

Em uma estrutura convencional as lajes se apoiam em vigas e essas descarregam nos pilares. Este sistema é muito eficiente, mas em situações de grandes vãos com situações elevadas de sobrecarga, essa solução pode se tornar antieconômica. No sistema estrutural de lajes lisas, essas se apoiam diretamente sobre os pilares, com as seguintes vantagens construtivas: ser mais econômica em relação ao sistema convencional para cargas de grande intensidade, permitir diminuição do pé direito aumentando assim a quantidade de pavimentos construídos em grandes edificações, facilidade na passagem de eletrodutos de instalações na sua face inferior, facilidades de execução, menores prazos de execução. Entretanto a tensão governante nas lajes lisas é o cisalhamento potencializado na ligação laje-pilar que é geralmente o ponto crítico deste sistema, podendo ocorrer ruptura por punção.

Essa pesquisa consta de uma avaliação experimental da punção em lajes lisas de concreto armado, tendo como principal objetivo o estudo da variação da ancoragem da armadura de punção tipo estribo. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com as prescrições normativas estabelecidas pela ABNT NBR 6118 (2014) e por códigos internacionais de referência, ACI 318M (2014) e o EUROCODE 2 (2004).

Nesta pesquisa, 4 painéis de lajes lisas foram ensaiadas até a ruptura no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, como maior objetivo reproduzir os efeitos de punção que as lajes lisas estão submetidas. Os painéis têm dimensões de 2500 x 2500 mm; altura de 180 mm; concreto com f_{cj} aproximado de 29,9 MPa e os pilares com seção transversal de 300 x 300 mm. Segundo as normas vigentes as armaduras de punção devem ser devidamente ancoradas nas armaduras de flexão, mas é prática usual em alguns países o uso de armaduras de punção sem ancoragem na armadura de flexão. Fundamentado nessa prática, esta pesquisa tem por finalidade a variação da ancoragem da armadura de punção entre os 4 painéis de laje ensaiados, sendo: a primeira laje de referência, denominada RSP, somente com armadura de flexão; a segunda laje, denominada FS-1, com armadura de punção ancorada na armadura tracionada e comprimida de flexão; a terceira laje, denominada FS-2, com armadura de punção ancorada somente na armadura de flexão comprimida e a quarta laje, denominada FS-3, com armadura de punção sem ancoragem na armadura de flexão tracionada e comprimida. Após a ruptura das lajes, constatou-se que a carga última das lajes com armadura de punção estava bem próxima, com carga aproximada de 12% superior para a laje FS-1 em relação à RSP, e de aproximadamente 16% e 11%, para as lajes FS-2 e FS-3 respectivamente, em relação à maciça de referência.

ABSTRACT

In a conventional structure the slabs rest on beams and these discharge into the pillars. This system is very efficient, but in situations of large spans with high overload situations, this solution may become uneconomical. In the structural system of smooth slabs, these support directly on the abutments, with the following constructive advantages: to be more economical in relation to the conventional system for high loads, to allow a decrease of the right foot, thus increasing the amount of pavements built in large buildings, easiness in the passage of electrical conduits of installations in its inferior face, facilities of execution, shorter periods of execution. However, the governing stress in the smooth slabs is the shear strengthened in the slab-pillar connection that is usually the critical point of this system, and puncture rupture can occur.

This research consists of an experimental evaluation of the puncture in smooth slabs of reinforced concrete, having as main objective the study of the variation of the anchorage of the punching arm type stirrup. The experimental results were compared with the normative prescriptions established by ABNT NBR 6118 (2014) and international reference codes, ACI 318M (2014) and EUROCODE 2 (2004).

In this research, 4 panels of plain slabs were tested until rupture in the Laboratory of Structures of the University of Brasília, as a greater objective to reproduce the effects of punching that the smooth slabs are submitted. The panels have dimensions of 2500 x 2500 mm; height of 180 mm; concrete with an approximate f_{cj} of 29,9 MPa and the columns with a cross section of 300 x 300 mm. According to current standards, punch armatures must be properly anchored in bending armatures, but it is standard practice in some countries to use non-anchored punch armatures in the bending armature. Based on this practice, this research has the purpose of varying the anchorage of the punch reinforcement between the 4 slab panels tested, being: the first reference slab, called RSP, only with flexural reinforcement; the second slab, called FS-1, with punch armor anchored in the armature drawn and compressed by flexing; the third slab, called FS-2, with punch armor anchored only in the compressed bending armature and the fourth slab, called FS-3, with an anchoring punch armature in the drawn and compressed bending armature. After the rupture of the slabs, it was found that the final load of the slabs with puncture reinforcement was very close, with a load of approximately 12% higher for the slab FS-1 in relation to the RSP, and of approximately 16% and 11% for the FS-2 and FS-3 slabs respectively, in relation to the massive reference.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO	6
1.2	OBJETIVOS	6
1.3	METODOLOGIA	7
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	9
2.1.1	ABNT NBR 6118 (2014) – PROJETO DE ESTRUTURA DE CONCRETO - PROCEDIMENTO	10
2.1.2	EUROCODE 2 (2004) – DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES – GENERAL RULES AND RULES FOR BUILDINGS	15
2.1.3	ACI 318 (2014)	19
2.1.3.3	<i>VERIFICAÇÃO DO CONTORNO EXTERNO ÀS ARMADURAS DE PUNÇÃO ..</i>	<i>21</i>
2.2	– TRABALHOS ANTERIORES	22
2.2.1	- CALDENTEY, LAVASELLI, PEIRETTI, FERNÁNDEZ (2013)	22
2.2.2	- BARTOLAC, DUVNJAK, DAMJANOVIĆ (2015).....	30
2.2.3	TRAUTWEIN (2006)	34
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	46
3.1	SISTEMA DE ENSAIOS	46
3.2	CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS.....	49
3.3	DETALHAMENTO DAS ARMADURAS	54
3.3.1	ARMADURAS DE FLEXÃO	54
3.3.2	ARMADURAS DE PUNÇÃO	56
3.3.3	ARMADURA DOS PILARES	62
3.4	INSTRUMENTAÇÃO.....	63
3.4.1	DESLOCAMENTOS VERTICAIS	63
3.4.2	DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE FLEXÃO E PUNÇÃO.....	64
3.4.3	DEFORMAÇÕES NO CONCRETO	68
3.5	CONCRETAGEM	69
3.6	ENSAIOS DOS MATERIAIS	71
3.6.1	CONCRETO	71
3.6.2	AÇO	72
3.7	RESISTÊNCIA A FLEXÃO DAS LAJES.....	73

4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES	76
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS NORMATIVOS	76
4.2	DESLOCAMENTOS VERTICAIS	79
4.2.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LAJE DE REFERÊNCIA RSP.....	79
4.2.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LAJE FS-1	80
4.2.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LAJE FS-2.....	81
4.2.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LAJE FS-3	82
4.3	DEFORMAÇÃO NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO.....	84
4.3.1	DEFORMAÇÃO NO CONCRETO NA LAJE DE REFERÊNCIA RSP	84
4.3.2	DEFORMAÇÃO NO CONCRETO NA LAJE FS-1	85
4.3.3	DEFORMAÇÃO NO CONCRETO NA LAJE FS-2	85
4.3.4	DEFORMAÇÃO NO CONCRETO NA LAJE FS-3	86
4.4	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO	88
4.4.1	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO LAJE RSP.....	89
4.4.2	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO LAJE FS-1	90
4.4.3	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO LAJE FS-2	92
4.4.4	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO LAJE FS-3	93
4.5	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE PUNÇÃO.....	95
4.5.1	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE PUNÇÃO DA LAJE FS-1.....	95
4.5.2	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE PUNÇÃO DA LAJE FS-2.....	97
4.5.3	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE PUNÇÃO DA LAJE FS-3.....	99
4.6	MAPAS DE FISSURAÇÃO	101
4.7	SUPERFÍCIE DE RUPTURA DAS LAJES	107
4.8	MODO DE RUPTURA	120
5	CONCLUSÕES.....	124
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	126
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
TABELA 1 - ARMADURA DE PUNÇÃO SEGUNDO O ACI.....	19
TABELA 2 - RESULTADOS TEÓRICOS E PRÁTICOS DO EXPERIMENTO A PUNÇÃO.....	29
TABELA 3 - RESULTADOS TEÓRICOS E PRÁTICOS DO EXPERIMENTO A PUNÇÃO.....	29
TABELA 4 - LAJES COM ARMADURA DE PUNÇÃO	33
TABELA 5 - LAJES SEM ARMADURA DE PUNÇÃO	33
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DAS LAJES DO GRUPO 02	41
TABELA 7 - LAJES COMPARADAS NO EXPERIMENTO (ADAPTADO).....	41
TABELA 8 - COMPARAÇÃO DA CARGA EXPERIMENTAL COM AS ESTIMATIVAS DA NBR- 6118/2003.....	42
TABELA 9 - COMPARAÇÃO DA CARGA EXPERIMENTAL COM OS A ESTIMATIVA ACI-318/02.....	42
TABELA 10 - COMPARAÇÃO DA CARGA EXPERIMENTAL COM OS A ESTIMATIVA PELO CEB/MC 90.....	43
TABELA 11 - COMPARAÇÃO DA CARGA EXPERIMENTAL COM OS A ESTIMATIVA PELO EC2/2002	44
TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS NA PESQUISA.....	49
TABELA 13 – RESULTADO MÉDIO DE ENSAIO DO CONCRETO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
TABELA 14 - RESULTADOS DE ENSAIO DO AÇO..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
TABELA 15 - MODO DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO.	75
TABELA 16 - RESULTADOS TEÓRICOS DA NORMA ABNT NBR 6118 (2014).....	76
TABELA 17 - RESULTADOS TEÓRICOS DA NORMA EUROCODE 2 (2004).....	76
TABELA 18 - RESULTADOS TEÓRICOS DA NORMA ACI 318 (2014).....	77
TABELA 19 - INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DAS LAJES.....	112
TABELA 20 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE RUPTURA DAS LAJES.....	122

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-SOLUÇÃO COM UTILIZAÇÃO DE LAJES LISAS.....	1
FIGURA 2 - CONE DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS	2
FIGURA 3 - FISSURAS DE PUNÇÃO NA FACE TRACIONADA DA LAJE	3
FIGURA 4 - A) COLAPSO PROGRESSIVO DE GARAGEM COBERTA EM 2008 EM ST-LAURENT, QUEBEC (BULLETIN 81 - PUNCHING SHEAR OF STRUCTURAL CONCRETE SLABS); B) ESTRUTURA DE LAJES LISAS APÓS O TERREMOTO DE 1985 NO MÉXICO (BULLETIN 81 - PUNCHING SHEAR OF STRUCTURAL CONCRETE SLABS); C) COLAPSO PROGRESSIVO EM ESTACIONAMENTO (HTTP://WWW.WINDSORSTAR.COM/GALLERY+PARKING+GARAGE+COLLAPSES/3251202/STORY.HTML)	3
FIGURA 5 - A) LAJES LISAS COM CAPITÉIS (HTTP://WWW.CONCRETECONSTRUCTION.NET); B) LAJES LISAS COM ÁBACOS (HTTPS://WWW.THECONSTRUCTOR.ORG)	4
FIGURA 6 - TIPOS DE RUPTURA POR PUNÇÃO EM LAJES COM ARMADURA DE PUNÇÃO.....	5
FIGURA 7 - DIFERENTES TIPOS DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO (TASSINARI, 2011).....	6
FIGURA 8 - (A) REPRESENTAÇÃO DE UMA VISTA DA LAJE EM ESTUDO; B) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LIGAÇÃO LAJE PILAR DAS LAJES EM ESTUDO (DIMENSÕES DADAS EM MILÍMETROS).....	8
FIGURA 9 - PERÍMETROS CRÍTICO C, C' E C'' EM PILAR INTERNO. (ABNT NBR6118 (2014)) ...	10
FIGURA 10 - A) DISPOSIÇÃO DA ARMADURA DE PUNÇÃO EM CORTE; B) DISPOSIÇÃO DE ARMADURAS DE PUNÇÃO EM PLANTA E CONTORNOS DE SUPERFÍCIE CRÍTICA C''	14
FIGURA 11 - A) REPRESENTAÇÃO EM CORTE DA ARMADURA DE PUNÇÃO (ABNT NBR6118, FIGURA 20.3); B) REPRESENTAÇÃO EM PLANTA DA ARMADURA DE PUNÇÃO (LAJES DA PESQUISA).	15
FIGURA 12 - PERÍMETROS CRÍTICOS CONSIDERADOS PEÇO EUROCODE 2 (2004).....	16
FIGURA 13 - PERÍMETRO DE CONTROLE PARA PILARES INTERNOS, [EUROCODE 2 (2004) – FIGURA 6.22]	18
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO DOS PERÍMETROS CRÍTICOS E ARMADURAS DE PUNÇÃO. (MODIFICADO – ACI 318M (2014), FIGURA. R22.6.4.2)	19
FIGURA 15 – ARMADURA DE PUNÇÃO ANCORADA NA ARMADURA DE FLEXÃO.....	22
FIGURA 16 - ARMADURA DE PUNÇÃO SEM ENVOLVER A ARMADURA DE FLEXÃO.	23

FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DA MONTAGEM E DETALHE DAS LAJES; A) DISPOSIÇÃO DOS APOIOS DA LAJE; B) DETALHES DOS APOIOS DAS LAJES	24
FIGURA 18 - DISPOSIÇÃO DAS LAJES 1 E 2 SEM ARMADURA DE PUNÇÃO; A) DETALHAMENTO DA ARMADURA LONGITUDINAL; B) CAMADA TRACIONADA DA ARMADURA DE FLEXÃO.	25
FIGURA 19 - DETALHES DAS LAJES 3 E 4 COM ARMADURA DE PUNÇÃO SEM ANCORAGEM A) DISPOSIÇÃO DOS ESTRIBOS EM CORTE, B) DISPOSIÇÃO DOS ESTRIBOS EM PLANTA	26
FIGURA 20 - DETALHES DAS LAJES 5 E 6 COM ESTRIBOS DEVIDAMENTE ANCORADAS; A) DISPOSIÇÃO DOS ESTRIBOS EM CORTE; B) DISPOSIÇÃO DOS ESTRIBOS EM PLANTA	27
FIGURA 21 - DETALHAS DAS LAJES 7 E 8 COM ESTRIBOS DEVIDAMENTE ANCORADOS A) DISPOSIÇÃO EM CORTE; B) VISTA MOSTRANDO A INTERRUPÇÃO DAS ARMADURAS DE FLEXÃO NO PILAR; C) DETALHES DA ARMADURA DE PUNÇÃO DEVIDAMENTE ANCORADOS	28
FIGURA 22 - DISPOSIÇÃO DAS ARMADURAS DE FLEXÃO E POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS (DIMENSÕES EM MILÍMETROS)	30
FIGURA 23 - A) DISPOSIÇÃO DAS ARMADURAS DE PUNÇÃO, B) ARMADURA DE PUNÇÃO MONTADA, C) DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO, (HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/282097318).....	31
FIGURA 24 - A) MONTAGEM DO EXPERIMENTO; B) LAJE APÓS A RUPTURA (NA FIGURA É MOSTRADA A PARTE TRACIONADA), (HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/282097318).....	32
FIGURA 25 - VISTA EM PLANTA DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DAS LAJES; A) LADO SUPERIOR; B) LADO INFERIOR, (HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/282097318).....	32
FIGURA 26 - CORTE MOSTRANDO OS CONES DE PUNÇÃO NAS LAJES	33
FIGURA 27 - SISTEMAS DE AÇÕES E REAÇÕES DAS LAJES UTILIZADAS PELO PESQUISADOR, A) EM PLANTA, B) EM PERFIL.....	35
FIGURA 28 - DETALHAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO, A) DESENHO EM PLANTA, B) DESENHO EM CORTE.....	36
FIGURA 29 - DETALHE DA ARMADURA DE PUNÇÃO, SEM ANCORAGEM NA ARMADURA DE FLEXÃO.	36
FIGURA 30 - DETALHE DA ARMADURA DE PUNÇÃO DA LAJE E1	37
FIGURA 31 - DETALHE DA ARMADURA DE PUNÇÃO PARA A LAJE E2.....	38
FIGURA 32 - DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO DAS LAJES E3, B4 E E5	39
FIGURA 33 - ARMADURA DE PUNÇÃO DA LAJE I6, I7 E I8	40
FIGURA 34 - ARMADURA DE PUNÇÃO DAS LAJES I9, I10 E I11	40
FIGURA 35 - REPRESENTAÇÃO DE MODELOS DE LAJES ENSAIADAS	46

FIGURA 36 - A) PÓRTICO E LAJE DE REAÇÃO (SANTOS - ADAPTADO); B) SISTEMA PRONTO PARA ENSAIO; C) VISTA SUPERIOR DO SISTEMA DE ENSAIO; D) VISTA LATERAL DO SISTEMA DE ENSAIO; E) PERSPECTIVA DA LAJE FS-3 PRONTA PARA SER ENSAIADA.....	48
FIGURA 37 – A) PERSPECTIVA DAS LAJES DOS ENSAIOS; B) CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS LAJES DOS ENSAIOS (MEDIDAS EM MILÍMETROS).....	49
FIGURA 38 – A) REPRESENTAÇÃO DAS ARMADURAS DA LAJE RPS DE REFERÊNCIA; B) REPRESENTAÇÃO DA LAJE RSP CORTE EM PERSPECTIVA.....	50
FIGURA 39 - A) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS ARMADURAS DA LAJE FS-1; B) REPRESENTAÇÃO DA LAJE FS-1 CORTE EM PERSPECTIVA; C) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ENTRELAÇAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO E PUNÇÃO NA LAJE FS-1.	51
FIGURA 40 - A) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS ARMADURAS DA LAJE FS-2; B) REPRESENTAÇÃO DA LAJE FS-2 CORTE EM PERSPECTIVA; C) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ENTRELAÇAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO E PUNÇÃO NA LAJE FS-2.	52
FIGURA 41 - A) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS ARMADURAS DA LAJE FS-3; B) REPRESENTAÇÃO DA LAJE FS-3 CORTE EM PERSPECTIVA; C) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ENTRELAÇAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO E PUNÇÃO NA LAJE FS-3.	53
FIGURA 42 - DETALHAMENTO DAS ARMADURAS DE FLEXÃO TRACIONADA (MEDIDAS EM MILÍMETROS).....	54
FIGURA 43 – DETALHAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO COMPRIMIDA (MEDIDAS EM MILÍMETROS).....	55
FIGURA 44 – A) REPRESENTAÇÃO DO CORTE AA DA ARMADURA DE FLEXÃO; B) REPRESENTAÇÃO DO CORTE BB DAS ARMADURAS DE FLEXÃO; C) REPRESENTAÇÃO DO DETALHAMENTO DOS GANCHOS DA ARMADURA DE FLEXÃO.	55
FIGURA 45 - PERSPECTIVA DAS ARMADURAS DE FLEXÃO.	56
FIGURA 46 – A) DISPOSIÇÃO DAS ARMADURAS DE PUNÇÃO TIPO ESTRIBO FECHADO NA LAJE; B) DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO.....	57
FIGURA 47 – DISPOSIÇÃO DAS ARMADURAS NA LAJE FS-1, A) DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO NO CORTE AA; B) DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO NO CORTE BB; C) PERSPECTIVA DA ARMADURA DE PUNÇÃO; D) DISPOSIÇÃO DA ARMADURA NA LAJE FS-1.	59
FIGURA 48 - A) DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO NO CORTE AA; B) DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO NO CORTE BB; C) PERSPECTIVA DA ARMADURA DE PUNÇÃO; D) DISPOSIÇÃO DA ARMADURA NA LAJE FS-2.	60

FIGURA 49 - A) DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO NO CORTE AA; B) DETALHAMENTO DA ARMADURA DE PUNÇÃO NO CORTE BB; C) PERSPECTIVA DA ARMADURA DE PUNÇÃO; D) DISPOSIÇÃO DA ARMADURA NA LAJE FS-2.....	61
FIGURA 50 – A) DETALHAMENTO DAS ARMADURAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DOS PILARES, MOSTRANDO A SEÇÃO TRANSVERSAL E ESTRIBO; B) DISPOSIÇÃO DAS ARMADURAS NAS LAJES.....	63
FIGURA 51 – A) DISPOSIÇÃO DOS LVDT’S SOBRE A LAJE (UNIDADES EM MILÍMETROS); FOTO DOS LVDT’S SOBRE A LAJE.....	64
FIGURA 52 - PROCEDIMENTO PARA INSTRUMENTAÇÃO DAS BARRAS DE FLEXÃO E PUNÇÃO.....	65
FIGURA 53 - POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS DAS ARMADURAS DE FLEXÃO TRACIONADA, A) EM PLANTA; B) CORTE AA E C) CORTE BB. CORTES AMPLIADOS PARA MELHOR ENTENDIMENTO DO DETALHAMENTO; D) IMAGEM DA POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA ARMADURA DE FLEXÃO TRACIONADA.	67
FIGURA 54 - A) POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA ARMADURA DE PUNÇÃO; B, C) VISTA DOS EXTENSÔMETROS EM CORTE; D) IMAGEM DO POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS.....	68
FIGURA 55 - INSTRUMENTAÇÃO DO CONCRETO NA PARTE INFERIOR DA LAJE (UNIDADES EM MILÍMETROS).....	69
FIGURA 56 - EXTENSÔMETROS FIXADOS NA PARTE INFERIOR DA LAJE PRÓXIMO AO PILAR.....	69
FIGURA 57 - PROCESSOS REALIZADOS NO DIA DA CONCRETAGEM	71
FIGURA 58 - ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO.	72
FIGURA 59 - ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA DO AÇO	72
FIGURA 60 - LINHAS DE RUPTURA PARA AS LAJES DA PESQUISA (UNIDADES EM MILÍMETROS), ADAPTADO - GUANDALINI ET. AL., (2009)	73
FIGURA 61 - TENSÕES NO ELU.....	74
FIGURA 62 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS NORMATIVOS	77
FIGURA 63 - REPRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO OESTE – LESTE	79
FIGURA 64 - REPRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO SUL – NORTE.....	80
FIGURA 65 - REPRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO OESTE – LESTE	80
FIGURA 66 - REPRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO SUL – NORTE.....	81
FIGURA 67 - REPRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO OESTE LESTE.....	81
FIGURA 68- REPRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO SUL - NORTE	82
FIGURA 69 - REPRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO OESTE LESTE.....	82
FIGURA 70 - REPRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO SUL – NORTE.....	83
FIGURA 71 - DESLOCAMENTOS MÉDIOS DOS LVDT'S DAS EXTREMIDADES DAS LAJES.	84

FIGURA 72 - DEFORMAÇÕES TANGENCIAIS E RADIAIS NO CONCRETO	84
FIGURA 73 - DEFORMAÇÕES TANGENCIAIS E RADIAIS NO CONCRETO	85
FIGURA 74 - DEFORMAÇÕES TANGENCIAIS E RADIAIS NO CONCRETO	85
FIGURA 75 - DEFORMAÇÕES TANGENCIAIS E RADIAIS NO CONCRETO	86
FIGURA 76 - MÉDIA DAS DEFORMAÇÕES TANGENCIAIS DE CADA LAJE.	86
FIGURA 77- MÉDIA DAS DEFORMAÇÕES RADIAIS DE CADA LAJE.....	87
FIGURA 78 - POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NAS ARMADURAS DE FLEXÃO TRACIONADAS.....	88
FIGURA 79 - REPRESENTAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NA DIREÇÃO OESTE LESTE DA ARMADURA DE FLEXÃO	89
FIGURA 80 - REPRESENTAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NA DIREÇÃO NORTE SUL DA ARMADURA DE FLEXÃO	89
FIGURA 81 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS EM FUNÇÃO DA CARGA	90
FIGURA 82 - REPRESENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO OESTE LESTE DA ARMADURA DE FLEXÃO	90
FIGURA 83 - REPRESENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO NORTE SUL DA ARMADURA DE FLEXÃO	91
FIGURA 84 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS EM FUNÇÃO DA CARGA	91
FIGURA 85 - REPRESENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO OESTE LESTE DA ARMADURA DE FLEXÃO	92
FIGURA 86 - REPRESENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO NORTE SUL DA ARMADURA DE FLEXÃO	92
FIGURA 87 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS EM FUNÇÃO DA CARGA	93
FIGURA 88 - REPRESENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO OESTE LESTE DA ARMADURA DE FLEXÃO	93
FIGURA 89 - REPRESENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO NORTE SUL DA ARMADURA DE FLEXÃO	94
FIGURA 90 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS EM FUNÇÃO DA CARGA	94
FIGURA 91 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO LESTE OESTE.....	96
FIGURA 92 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO NORTE SUL.....	96
FIGURA 93 - REPRESENTAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE PUNÇÃO.....	97
FIGURA 94 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO LESTE OESTE.....	97
FIGURA 95 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO NORTE SUL.....	98
FIGURA 96 - REPRESENTAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE PUNÇÃO.....	98
FIGURA 97 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO LESTE OESTE.....	99

FIGURA 98 - DEFORMAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS NA DIREÇÃO NORTE SUL.....	99
FIGURA 99- REPRESENTAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE PUNÇÃO	100
FIGURA 100 -A) FOTO DO MAPA DE FISSURAÇÃO DA LAJE RSP DE REFERÊNCIA; B) REPRESENTAÇÃO DA LAJE RSP DE REFERÊNCIA.....	102
FIGURA 101 - FOTO DO MAPA DE FISSURAÇÃO DA LAJE FS-1; B) REPRESENTAÇÃO DA LAJE FS-1.	103
FIGURA 102 - FOTO DO MAPA DE FISSURAÇÃO DA LAJE FS-2; B) REPRESENTAÇÃO DA LAJE FS-2	104
FIGURA 103 - FOTO DO MAPA DE FISSURAÇÃO DA LAJE FS-3; B) REPRESENTAÇÃO DA LAJE FS-- 3.....	105
FIGURA 104 - REPRESENTAÇÃO DOS CORTES DAS LAJES; A) LAJE RSP DE REFERÊNCIA; B) LAJE FS-1; C) LAJE FS-2; D) LAJE FS-3.....	107
FIGURA 105 - INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA LAJE RSP; B) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORTE LESTE; C) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORTE NORTE.	108
FIGURA 106 - A) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA LAJE FS-1; B) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORTE LESTE; C) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORTE NORTE.	109
FIGURA 107 - A) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA LAJE FS-2; B) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORTE NORTE; C) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORTE LESTE.	110
FIGURA 108 - A) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA LAJE FS-3; B) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORTE LESTE; C) INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO CORTE NORTE.	111
FIGURA 109 - A) SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA LAJE RSP; B) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA FACE LESTE; C) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA FACE NORTE.	113
FIGURA 110 - A) SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA LAJE FS-1; B) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA FACE LESTE; C) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA FACE NORTE.....	114
FIGURA 111 - A) SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA LAJE FS-2; B) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO NORTE; C) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO LESTE.	115
FIGURA 112 - A) SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA LAJE FS-3; B) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO LESTE; C) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO NORTE.	116

FIGURA 113 - A) REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA E DO CONE DE PUNÇÃO DA LAJE RSP; B) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA FACE LESTE; C) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DA FACE NORTE.	117
FIGURA 114 - SUPERFÍCIE DE RUPTURA E CONE DE PUNÇÃO DA LAJE FS-1; B) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO LESTE; C) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO NORTE.	118
FIGURA 115 - SUPERFÍCIE DE RUPTURA E CONE DE PUNÇÃO DA LAJE FS-2; B) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO LESTE; C) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO NORTE.	119
FIGURA 116 - SUPERFÍCIE DE RUPTURA E CONE DE PUNÇÃO DA LAJE FS-3; B) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO LESTE; C) CORTE E SUPERFÍCIE DE RUPTURA DO LADO NORTE.	120
FIGURA 117 - VISTAS A 90 GRAUS DOS CONES DE PUNÇÃO; A) LAJE RSP DE REFERÊNCIA; B) LAJE FS-1; C) LAJE FS-2; D) LAJE FS-3.	121

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
A_v	Ângulo de inclinação entre o eixo da armadura de punção e o plano da laje;
A_{SW}	Área de aço da seção transversal de uma camada de armadura de punção;
A_s	Área de aço no comprimento unitário da faixa;
B	Razão entre a maior e a menor dimensão do pilar;
B_1	Comprimento do lado da laje, sendo nesta pesquisa 2500 mm;
b_0	Perímetro crítico, tomado à distância de $d/2$ do pilar;
b_w	Comprimento unitário de faixa de laje;
C	Lado do pilar quadrado, ou o diâmetro do pilar circular;
c	Comprimento do lado do pilar, sendo nesta pesquisa 300 mm;
$Cr d_c$	Coefficiente de correção da tensão de cisalhamento resistente de projeto do concreto da laje (EUROCODE 2 (2004));
D	Distância entre as armaduras mais externas de linhas vizinhas.
d	Altura útil da laje, em metros. $d=(d_x + d_y)/2$;
d_x	Altura útil da laje na direção x;
d_y	Altura útil da laje na direção y;
d_c	Altura útil da laje na face do pilar;
E_c	Modulo de elasticidade;
e_{ys}	Deformação específica do aço;
F_{SD}	Carga de projeto da reação do pilar;
f_{yt}	Tensão de escoamento característica do aço das armaduras de punção, em MPa, limitado a 420 MPa;
f_c	Resistencia a compressão do concreto;
f'_c	Tensão resistente a compressão do concreto, limitado ao máximo de 69 MPa;
f_{ck}	Tensão de resistência característica do concreto à compressão;
f_{cd}	Tensão de resistência de projeto do concreto à compressão;
f_{ct}	Medida de tração por compressão diametral;
F_{ywd}	Tensão de escoamento de projeto das armaduras de punção;

f_{ys}	Tensão de escoamento do aço;
$Fywd_{efe}$	Tensão de escoamento de projeto efetiva das armaduras de punção (EUROCODE 2 (2004));
K	<i>Size effect</i> (EUROCODE 2 (2004));
l_c	Distância entre a borda do capitel e a face do pilar;
M	Distância entre duas linhas de armaduras em um mesmo ramo da cruz;
m	Distância entre duas linhas de armaduras em um mesmo ramo da cruz;
m_r	Momento resistente da seção transversal da laje com largura unitária;
N	Quantidade total de linhas de armaduras de punção;
n	Quantidade total de linhas de armaduras de punção;
Q	Quantidade de camadas de armaduras de punção em volta do pilar;
q	é a quantidade de camadas de armaduras de punção em volta do pilar;
r_q	Distancia do centro do pilar ao ponto de aplicação da carga, sendo nesta pesquisa 1124 mm;
S	Distância entre armaduras de punção em uma mesma linha, em metros, limitado ao máximo de $0,5d$;
S_r	Espaçamento radial entre as barras de aço de punção;
τ_{SD}	Tensão solicitante de projeto;
τ_{Rd1}	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada de concreto;
τ_{Rd2}	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal comprimida de concreto;
τ_{Rd3}	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada na presença de armaduras de punção;
u	Comprimento do perímetro crítico na face do pilar;
u'	Comprimento do perímetro crítico afastado da face do pilar;
u_{out}	Comprimento do perímetro crítico afastado das armaduras de punção externas;
u_0	Perímetro crítico, tomado à distância de $d/2$ do pilar;
x	Altura da linha neutra em relação a fibra mais comprimida;
ρ	Taxa de armadura da laje;
ρ_x	Taxa de armadura da laje na direção x ;

ρ_y	Taxa de armadura da laje na direção y;
ρ_{cp}	Tensão no concreto, devido a proteção;
V_{flex}	Resistencia a flexão da laje;
$Vrd_{m\acute{a}x}$	Carga resistente de projeto da laje à compressão diagonal do concreto;
v	Fator de redução da força do concreto fissurado no cisalhamento (EUROCODE 2 (2004));
Vrd_c	Carga resistente característica da laje à tração diagonal do concreto;
Vrk_c	Carga resistente característica da laje à tração diagonal do concreto;
$Vrk_{m\acute{a}x}$	Carga resistente característica da laje à compressão diagonal do concreto;
Vrk_c	Carga resistente característica da laje à tração diagonal do concreto;
γ_c	Coefficiente de minoração da resistência do concreto;
Vrd_{cs}	Carga resistente de projeto da laje à tração diagonal na presença de armaduras de punção;
\emptyset	Ângulo em relação ao eixo central da laje e o eixo r_q , sendo nesta pesquisa igual a 21° ;
λ	Fator de modificação para levar em conta a redução das propriedades mecânicas dos concretos de baixa densidade (ACI 318 (2014));
a_s	É uma constante usada para computar a carga resistente em lajes ou sapatas (ACI 318 (2014));
a	É o ângulo de inclinação entre o eixo da armadura de punção e o plano da laje.

1 INTRODUÇÃO

Na fase de concepção de uma estrutura de concreto armado, a escolha do sistema estrutural adequado deve ser feita levando em conta uma série de fatores, como a finalidade da edificação, as cargas de utilização, tamanho dos vãos, disponibilidade de materiais e mão de obra, o processo construtivo adotado, as especificações do projeto arquitetônico entre outros requisitos específicos de cada região. No Brasil um sistema estrutural bastante utilizado é o sistema convencional onde as cargas das lajes são descarregadas nas vigas e estas descarregam nos pilares. Porém tem-se inserido também, a exemplo da América do Norte, países Europeus e Ásia, a utilização de lajes apoiadas diretamente sobre os pilares. As lajes que se apoiam diretamente sobre pilares são conhecidas como lajes lisas podendo ser classificadas como nervuradas ou maciças. Se forem utilizados capitéis ou ábacos para redução das tensões de cisalhamento na ligação laje-pilar será classificada como laje cogumelo. A Figura 1 mostra soluções para utilização de lajes lisas.



Lajes lisas maciças
(<https://www.civildigital.com>)



Lajes lisas maciças com capitéis
(<https://www.theconstructor.org>)

Figura 1-Solução com utilização de lajes lisas

O sistema construtivo de lajes lisas está em ascensão no Brasil e apresenta diversas vantagens se comparado com o sistema convencional laje-viga-pilar. Uma das vantagens mais expressivas é a simplificação na execução de formas devido à ausência de viga ocorrendo uma diminuição de recortes, diminuindo de forma significativa o tempo de execução da obra; uma maior flexibilidade na definição de espaços internos uma vez que os *layouts* não estarão condicionados a vigas, podendo ser modificado; simplificação das instalações prediais, uma vez que diminuem a quantidade de curvas pela ausência de vigas; permite uma diminuição do pé direito, aumentando assim o número de andares em edifícios de múltiplos pavimentos, para uma mesma altura de edifício.

As lajes lisas, entretanto, não devem ser vistas como um tipo de estrutura que pode ser empregado em qualquer situação. Em edifícios residenciais geralmente há uma disposição irregular dos pilares, e isto pode levar a situações antieconômicas em virtude da grande disparidade de vãos. Além disso, uma estrutura em laje lisa é, em geral, muito mais deformável que em estruturas convencionais (com vigas) podendo causar sérios problemas em alvenarias e até levando a estrutura a atingir os estados limites de utilização (ELS). Em edifícios de alturas elevadas apresenta uma redução na rigidez quando sujeitos a esforços horizontais (vento) consequência da ausência de vigas, que promovem maior rigidez devido a formação de pórticos espaciais. Por fim, as lajes lisas apresentam elevados esforços de cisalhamento na ligação da laje com pilar, de modo que a laje tende a ser perfurada pelo apoio, fenômeno conhecido como punção, podendo provocar uma ruína parcial ou total da estrutura, por colapso progressivo. Broms (2005) afirma que ruptura por punção se assemelha à de uma viga, de modo a apresentar uma fissura de cisalhamento que se estende das extremidades do pilar até a face superior da laje em um ângulo de inclinação β , como representado abaixo, dando origem a uma superfície de ruptura com forma de tronco de cone. A Figura 2 mostra o aspecto do puncionamento de uma laje por um pilar.

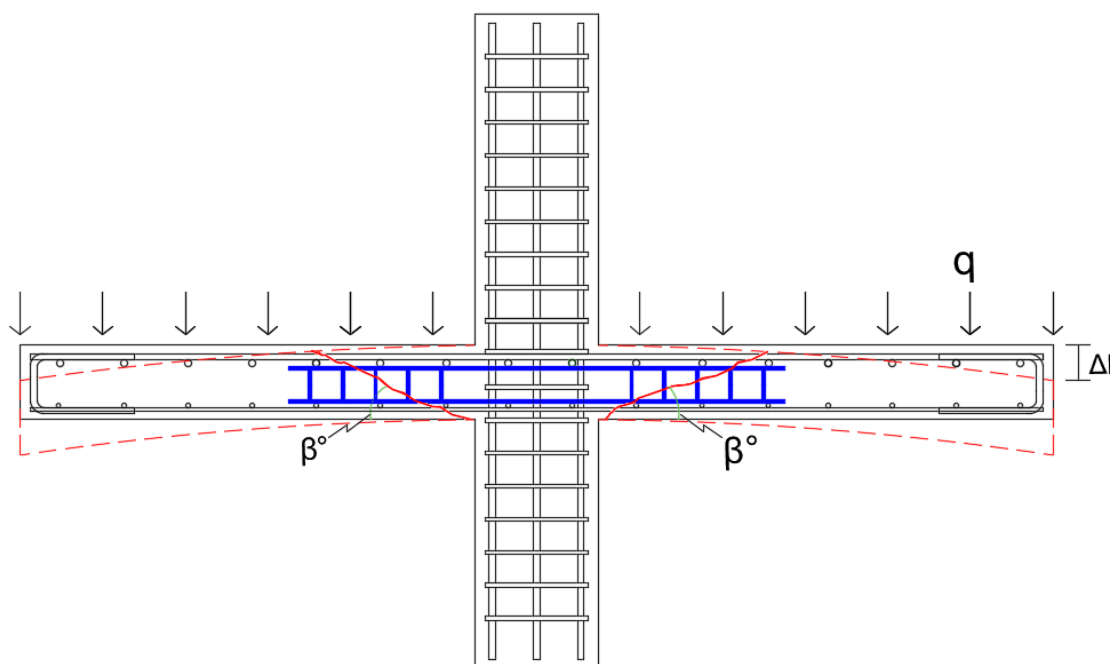


Figura 2 - Cone de punção em lajes lisas

A Figura 3 exemplifica fissuras de punção na face tracionada da laje em decorrência das tensões tangenciais e radiais.

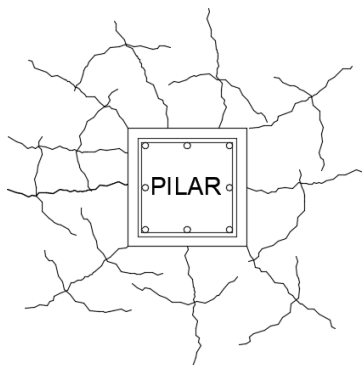


Figura 3 - Fissuras de punção na face tracionada da laje

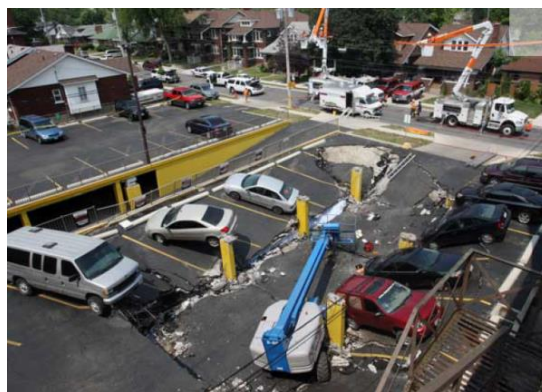
De acordo com Cunha (1998) o primeiro caso de que se tem notícia de ruptura por punção foi no prédio *Prest-o-Lite* (1911), em Indianápolis, com as lajes se desligando totalmente dos pilares, causando 58 mortes. Outros casos de estruturas que vieram ao colapso devido à punção são exemplificados na Figura 4.



a)



(b)



(c)

Figura 4 - a) Colapso progressivo de garagem coberta em 2008 em St-Laurent, Quebec (Bulletin 81 - Punching Shear of Structural Concrete Slabs); b) Estrutura de lajes lisas após o terremoto de 1985 no México (Bulletin 81 - Punching Shear of Structural Concrete Slabs); c) Colapso progressivo em estacionamento (<http://www.windsorstar.com/gallery+parking+garage+collapses/3251202/story.html>)

A punção é uma forma de ruptura brusca por cisalhamento, que pode ocorrer em lajes lisas de concreto, devido à ação de cargas concentradas em uma área, normalmente a reação de um pilar ou uma força concentrada. Uma ruptura localizada deste tipo provoca a redistribuição dos esforços aos pilares vizinhos, podendo levar a estrutura a um colapso progressivo, com consequências catastróficas.

É possível aumentar a resistência na ligação laje-pilar através da adoção de concretos de maior resistência ou aumento da taxa de armadura de flexão. Uma segunda solução é o aumento das seções dos pilares ou da espessura da laje nas proximidades das ligações, com o uso de capitéis ou ábacos (Figura 5), entretanto essas soluções em muitos casos não são convenientes devido às restrições arquitetônicas e um aumento do custo da obra.



a) Laje lisa com capitéis



(b) Laje lisa com ábacos

Figura 5 - a) Lajes lisas com capitéis (<http://www.concreteconstruction.net>); b) Lajes lisas com ábacos (<https://www.theconstructor.org>)

Uma opção eficiente para aumentar a capacidade resistente de uma laje lisa é o uso de armaduras de cisalhamento de combate à punção. Em lajes lisas de concreto armado com armadura de punção à ruptura por punção pode ocorrer de três modos distintos, representado pela Figura 6 sendo: o esmagamento da diagonal comprimida de concreto próxima à face do pilar (a); o esgotamento da resistência à tração diagonal da ligação laje-pilar quando a ruptura ocorre dentro da região das armaduras de punção (b); a ruptura também pode ocorrer fora da região da armadura de punção se assemelhando à ruptura de lajes sem armadura de punção (c).

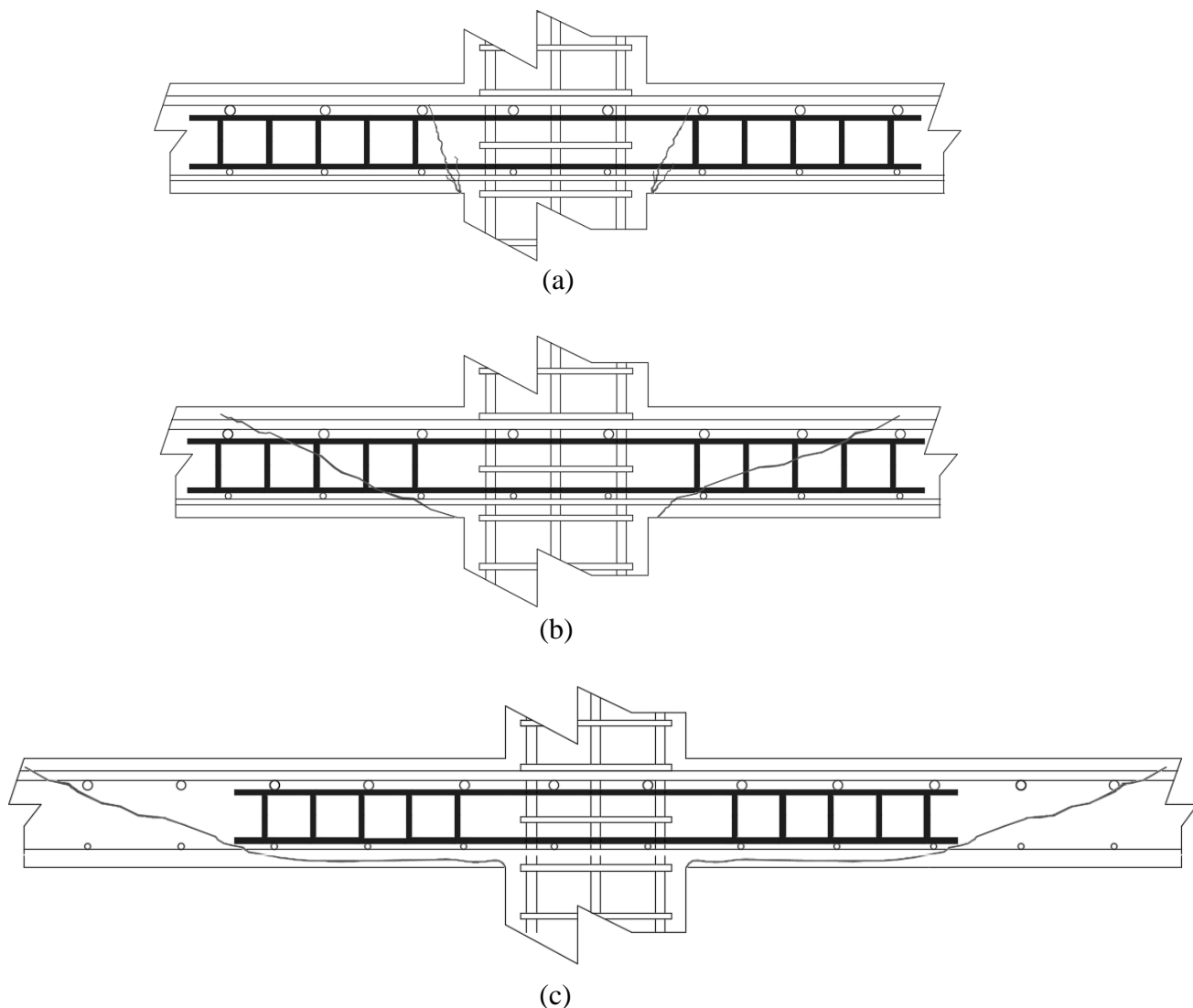


Figura 6 - Tipos de ruptura por punção em lajes com armadura de punção

A resistência à punção está diretamente ligada a inclinação da superfície de ruptura. Em lajes lisas sem armadura de punção normas como CEB-FIP MC90:1993 preveem uma inclinação entre 25° e 30° . Essa inclinação pode ser influenciada por diferentes aspectos como taxas das armaduras de flexão, resistência do concreto, taxas das armaduras de punção, disposição das armaduras, formas de ancoragens, entre outros.

A punção pode ser classificada como simétrica assimétrica ou excêntrica. A punção simétrica ocorre quando há simetria biaxial (a); punção assimétrica ocorre em situações não simétricas ou simetria uniaxial, porém sem transferência de momentos fletor na ligação laje-pilar (b); por último a punção excêntrica que ocorre com transferência de momento fletor devido à existência de excentricidade na ligação (c), como representado na Figura 7.

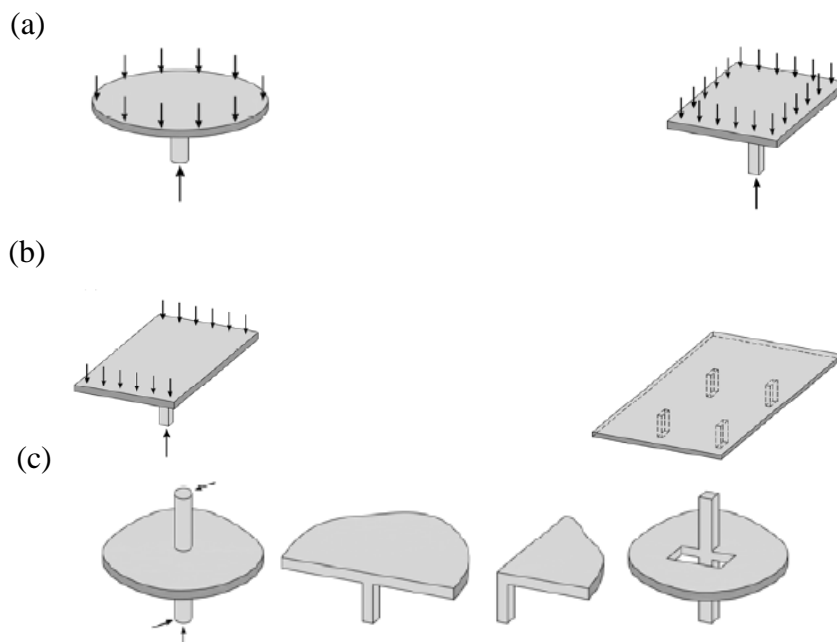


Figura 7 - Diferentes tipos de punção em lajes lisas de concreto armado (TASSINARI, 2011)

1.1 MOTIVAÇÃO

A ancoragem da armadura de punção nas armaduras de flexão é de difícil execução em obra uma vez que aquelas estão entrelaçadas nestas, dificultando a execução em obra e aumentando de forma considerável o tempo de execução da ancoragem da armadura de punção. Neste sentido esta pesquisa tem como motivação pesquisar através de comprovações experimentais métodos alternativos de ancoragem da armadura de punção, fazendo uma análise comparativa da armadura totalmente ancorada, parcialmente ancorada e sem ancoragem.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo da pesquisa é avaliar, a partir de comprovações experimentais, a resistência das lajes lisas à punção com carregamento simétrico variando a ancoragem da armadura de punção.

Como objetivos específicos citam-se:

- Avaliação dos modelos de cálculo da resistência de lajes lisas à punção preconizados pelas normas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e EUROCODE 2 (2004) e seus valores comparados com os resultados experimentais obtidos.
- Análise das deformações nas armaduras de flexão e punção;

- Análise das deformações na superfície do concreto e o deslocamento que a laje terá a cada passo de carga;
- Análise das superfícies e modos de ruptura das lajes.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia a ser seguida será a execução e instrumentação de 4 lajes lisas, sendo 1 laje de referência sem armadura de punção denominada RSP, e 3 lajes com variação da ancoragem da armadura de punção, a serem descritas no capítulo 3. As lajes foram rompidas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, sendo as cargas aplicadas até a ruptura das lajes. Estes ensaios fazem parte da pesquisa de doutorado do aluno Henrique Jorge Nery de Lima do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (2018).

Todas as lajes possuem as mesmas dimensões e taxas de armaduras de flexão, variando a ancoragem da armadura de punção, sendo uma totalmente ancorada (nas armaduras de flexão tracionada e comprimida) denominada FS-01, outra com ancoragem apenas na armadura de flexão comprimida denominada FS-02 e a última sem ancoragem alguma (servindo até como espaçador) denominada FS-03.

Os resultados dos ensaios serão analisados quanto à carga de ruptura, deslocamentos verticais e deformações no concreto e no aço. As cargas de ruptura serão comparadas com os valores estimados pela ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e EUROCODE 2 (2004).

A Figura 8 mostra de forma simplificada as dimensões das lajes em estudo.

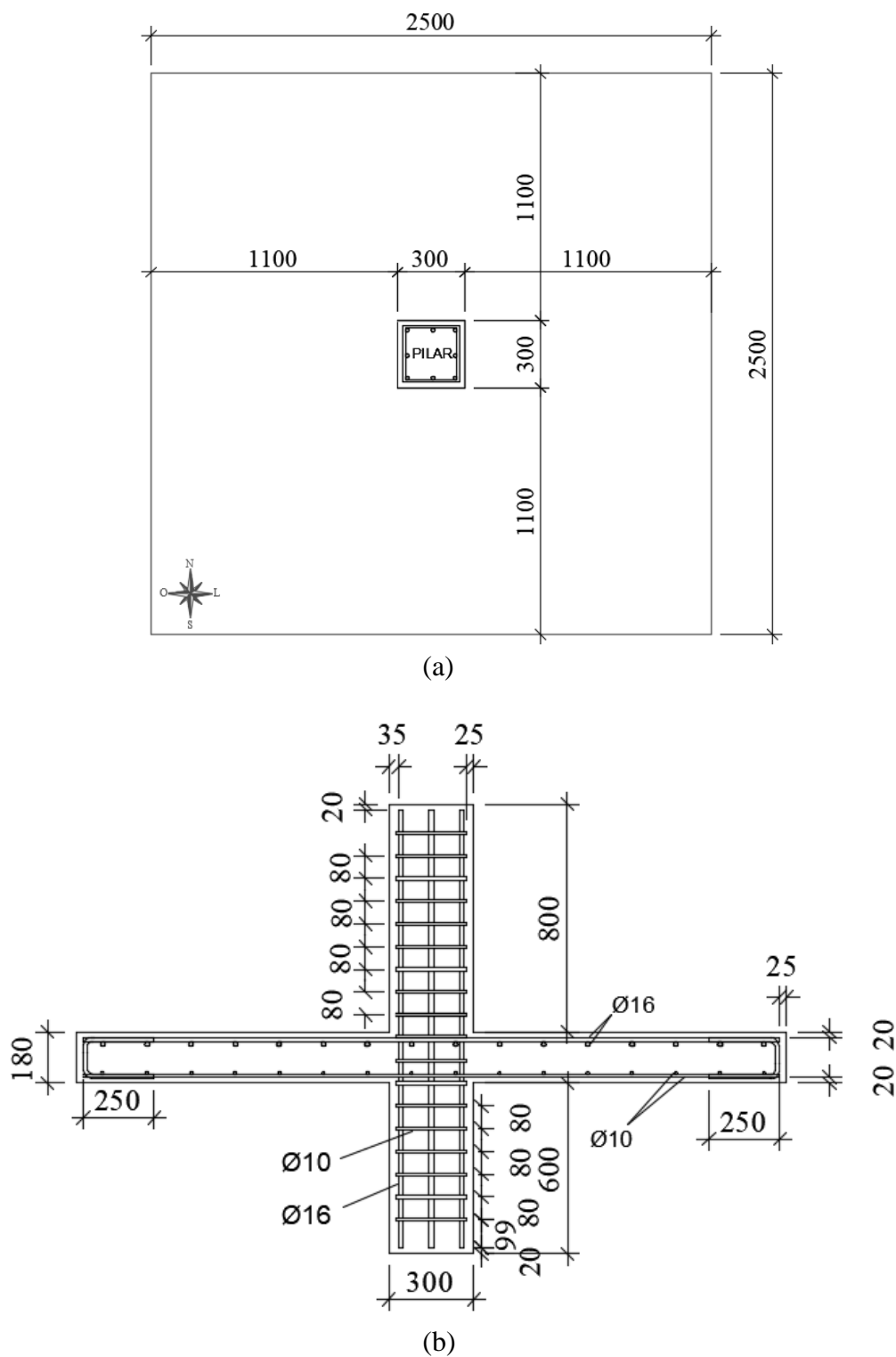


Figura 8 - (a) Representação de uma vista da laje em estudo; b) Representação esquemática da ligação laje pilar das lajes em estudo (dimensões dadas em milímetros)

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 6 capítulos.

O capítulo 1 traz uma breve introdução ao leitor do assunto abordado na pesquisa, sendo apresentados os conceitos básicos, objetivos e a metodologia.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica apresentando trabalhos de pesquisas anteriores relativas aos assuntos abordados nesta pesquisa, mostrando tabelas, gráficos e resultados obtidos. Logo após, é feita uma abordagem sobre as principais normas vigentes e estudadas nesta pesquisa que são: ABNT NBR 6118 (2014), EUROCODE 2 (2004) e ACI 318 (2014), sendo os valores teóricos normativos obtidos destas normas comparados com os valores experimentais da pesquisa.

O capítulo 3 apresenta o cronograma experimental, onde são detalhadas as 4 lajes estudadas nesta pesquisa mostrando: o sistema de ensaio; tipos de armaduras de flexão, punção e dos pilares; instrumentação em geral como LVDT's, extensômetros de concreto e aço.

O capítulo 4 apresentam os resultados experimentais e análises sendo comparados com os resultados teóricos normativos. Também são apresentados os mapas de fissuração, superfícies de rupturas das lajes e modos de ruptura.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

No capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao decorrer deste tópico será aprofundada a discussão sobre rupturas por puncionamento em lajes lisas de concreto armado submetido a carregamento simétrico. Foram analisados trabalhos anteriores relacionados ao assunto, assim como as prescrições normativas como o ACI 318 (2014); ABNT NBR 6118 (2014) e EUROCODE 2 (2004) relacionados ao tema da pesquisa.

2.1 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

Na verificação de resistência a punção a maioria das prescrições normativas seguem o modelo de cálculo correspondente à verificação da punção em duas ou mais superfícies críticas definidas no entorno de forças concentradas (ligação laje-pilar ou força concentrada).

As distâncias entre essas superfícies críticas são estimadas por ensaios laboratoriais e não tem nenhum significado físico.

2.1.1 ABNT NBR 6118 (2014) – PROJETO DE ESTRUTURA DE CONCRETO - PROCEDIMENTO

A seção 19.5 da ABNT NBR 6118 (2014) versa sobre o cálculo de lajes maciças à punção. A norma delimita perímetros críticos em torno da ligação laje-pilar, como ilustrado na Figura 9.

“Na primeira superfície crítica (contorno C), do pilar ou da carga concentrada, deve ser verificada indiretamente a tensão de compressão diagonal do concreto, através da tensão de cisalhamento.”

“Na segunda superfície crítica (contorno C') afastada $2d$ do pilar ou carga concentrada, deve ser verificada a capacidade da ligação à punção, associada à resistência à tração diagonal. Essa verificação também é feita através de uma tensão de cisalhamento, no contorno C'.”

Caso haja necessidade, a ligação deve ser reforçada por armadura transversal.

“A terceira superfície crítica (contorno C'') apenas deve ser verificada quando for necessário colocar armadura de punção.” Item 19.5.1 da ABNT NBR 6118.

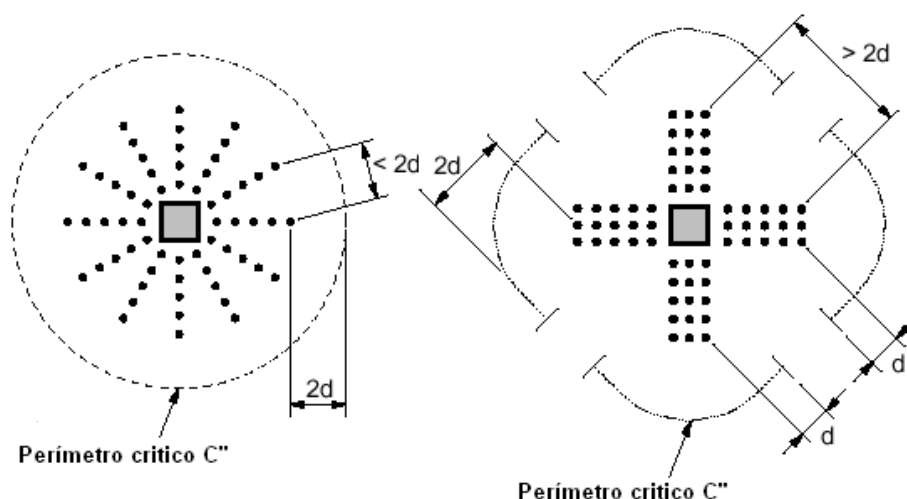


Figura 9 - Perímetros crítico C, C' e C'' em pilar interno. (ABNT NBR6118 (2014))

2.1.1.1 PILARES INTERNOS COM CARREGAMENTO SIMÉTRICO - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO SOLICITANTE NAS SUPERFÍCIES CRÍTICAS C, C' E C''.

Para pilares internos com carregamento simétrico mostrado na Figura 9 as tensões solicitantes nas superfícies C, C' e C'' é expressa pela ABNT NBR (6118) 2014 como:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} \quad (2.1)$$

Sendo:

F_{sd} é a carga de projeto da reação do pilar;

u é o comprimento do perímetro crítico em C, C' e C'';

d é a altura útil da laje, em centímetros.

$$d = \frac{dx + dy}{2} \quad (2.2)$$

Sendo:

d_x é a altura útil da laje na direção x;

d_y é a altura útil da laje na direção y;

2.1.1.1.1 VERIFICAÇÃO DA TENSÃO RESISTENTE DE COMPRESSÃO DIAGONAL DO CONCRETO EM C – DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESISTENTES.

A primeira análise a ser realizada é a verificação da tensão resistente de compressão diagonal do concreto na superfície crítica C. Essa análise é feita em lajes submetidas à punção com ou sem armadura de punção.

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \quad (2.3)$$

Sendo:

τ_{sd} é a tensão solicitante de projeto;

τ_{Rd2} é a tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal comprimida de concreto;

f_{ck} é a tensão de resistência característica do concreto à compressão;

f_{cd} é a tensão de resistência de projeto do concreto à compressão;

O valor de τ_{Rd2} pode ser ampliado de 20% por efeitos de estados múltiplos de tensões junto a um pilar interno, quando os vãos que chegam a esse pilar não diferem mais de 50% e não existem aberturas juntas ao pilar.

Para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} \cdot u_0 \cdot d = V_{Rd,máx} \quad (2.4)$$

Sendo em uma análise experimental a carga resistente característica é calculada por:

$$F_{Sk} \leq 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{ck} \cdot u_0 \cdot d = V_{Rk,máx} \quad (2.5)$$

2.1.1.1.2 TENSÃO RESISTENTE NA SUPERFÍCIE CRÍTICA C' EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS SEM ARMADURA DE PUNÇÃO - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESISTENTES

Para verificação da tensão resistente na superfície crítica C' temos que verificar se existe armadura de punção ou não. Para lajes sem armadura de punção a prescrição da ABNR NBR 6118 (2014) é:

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}}\right) (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

Sendo:

$$\rho = \sqrt[2]{\rho_x \cdot \rho_y}, \quad (2.7)$$

$$d = (d_x + d_y)/2 \quad (2.8)$$

Onde:

τ_{Rd1} é a tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada de concreto;

ρ é a taxa de armadura da laje;

ρ_x é a taxa de armadura da laje na direção x;

ρ_y é a taxa de armadura da laje na direção y;

d é a altura útil da laje, em centímetros.

Para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d = V_{Rd,c} \quad (2.9)$$

Sendo em uma análise experimental, a carga resistente característica é calculada por:

$$F_{Sk} \leq 0,182 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d = V_{Rk,c} \quad (2.10)$$

2.1.1.1.3 TENSÃO RESISTENTE NA SUPERFÍCIE CRÍTICA C' EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS COM ARMADURA DE PUNÇÃO - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESISTENTES

Para trechos com armaduras de punção, a tensão resistente na superfície C' pode ser encontrada como:

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd3} = 0,10 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 1,5 \frac{d}{S_r} \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \text{sen}\alpha}{u_1 \cdot d} \quad (2.11)$$

Onde:

τ_{Rd3} é a tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada na presença de armaduras de punção;

A_{sw} é a área de aço da seção transversal de uma camada de armadura de punção;

f_{ywd} é a tensão de escoamento de projeto das armaduras de punção;

S_r é o espaçamento radial entre as barras de aço de punção;

α é o ângulo de inclinação entre o eixo da armadura de punção e o plano da laje.

A armadura de punção deve ser preferencialmente constituída de três ou mais linhas de armaduras de punção (podendo ser do tipo pino, estribo aberto, estribo fechado, etc.) com extremidades alargadas, disposta radialmente ou em cruz a partir do perímetro do pilar. Cada extremidade deve ser ancorada fora do plano da armadura de flexão correspondente.

Para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq \left[0,10 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \text{sen}\alpha}{u_1 d} \right] \cdot u_1 \cdot d = V_{Rd,cs} \quad (2.12)$$

Sendo em uma análise experimental, a carga resistente característica é calculada por:

$$F_{Sk} \leq \left[0,14 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{ywk} \cdot \text{sen} \alpha}{u_1 \cdot d} \right] \cdot u_1 \cdot d = V_{Rk,cs} \quad (2.13)$$

2.1.1.1.4 DEFINIÇÃO DA SUPERFÍCIE CRÍTICA C''

Quando a resistência do concreto mostrar se insuficiente no perímetro crítico C' devem ser adotada armaduras de punção. Ela deve ser estendida em contornos paralelos a C', até que em um contorno C'' afastado 2d do último contorno da armadura não seja mais necessária armadura ou seja $\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1}$. Na Figura 10 estão representadas as disposições das armaduras de punção (item 19.5.3.4) ABNT NBR 6118 (2014).

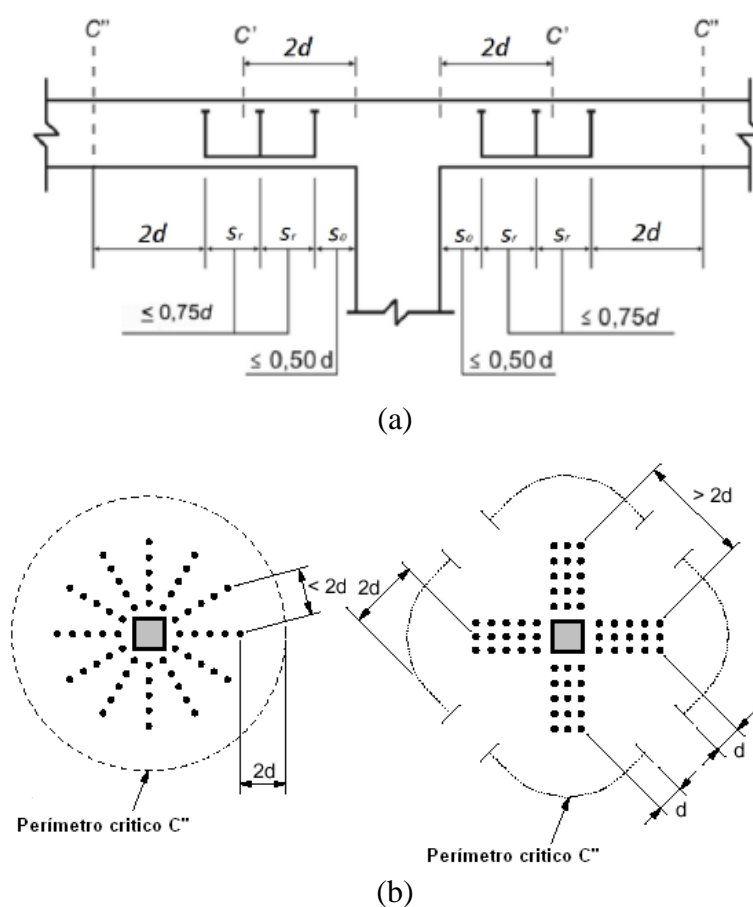


Figura 10 - a) Disposição da armadura de punção em corte; b) Disposição de armaduras de punção em planta e contornos de superfície crítica C''

Em casos em que a estabilidade global da estrutura depender da resistência da laje à punção, deve ser prevista armadura de punção, mesmo que τ_{sd} seja menor que τ_{Rd1} . Essa armadura deve equilibrar um mínimo de 50% de F_{sd} (Item 19.5.3.5).

Para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d = V_{Rd,out} \quad (2.14)$$

Sendo em uma análise experimental, a carga resistente característica é calculada por:

$$F_{Sk} \leq 0,182 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d = V_{Rk,out} \quad (2.15)$$

2.1.1.2 ARMADURAS DE PUNÇÃO

As armaduras de punção devem ser constituídas por estribos verticais ou conectores (*studs*), tendo os estribos diâmetros não superior a $h/20$ da laje, havendo ancoragem necessária entre a armadura de flexão e punção. (ABNT NBR 6118 (2014), pág. 172). Na Figura 11 está representada de forma esquemática as armaduras de punção.

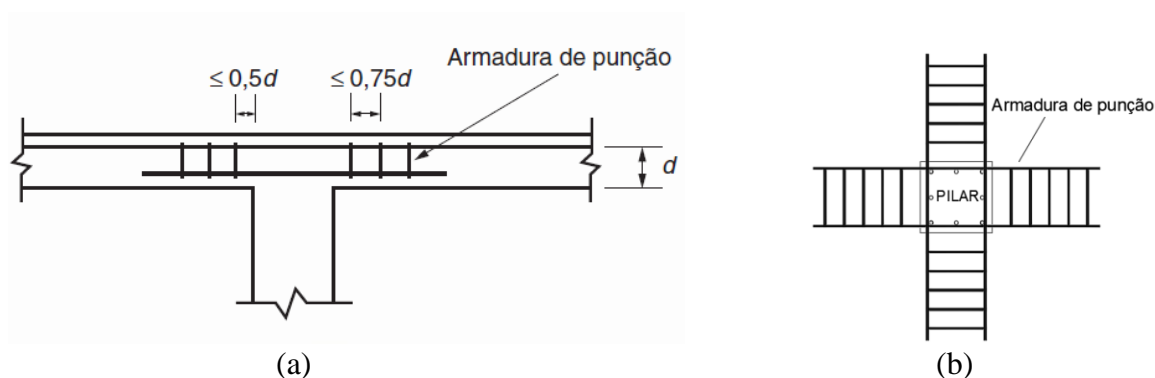


Figura 11 - a) Representação em corte da armadura de punção (ABNT NBR6118, Figura 20.3); b) Representação em planta da armadura de punção (Lajes da pesquisa).

2.1.2 EUROCODE 2 (2004) – DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES – GENERAL RULES AND RULES FOR BUILDINGS

As considerações abordadas nesta seção incluem as atualizações EN 1992-1-1:2004/AC:2010 e EN 1992-1-1:2004/prA1:2013. A seção 6.4 é dedicada ao cálculo de lajes à punção. A norma delimita perímetros críticos em torno da ligação laje-pilar, como ilustrado na Figura 12.

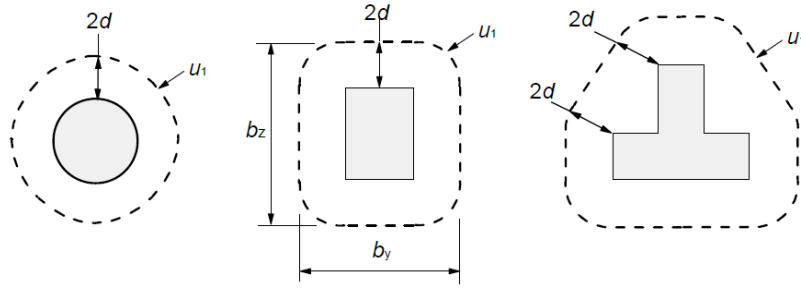


Figura 12 - Perímetros críticos considerados pelo EUROCODE 2 (2004)

A resistência a punção deve ser verificada na face do pilar (perímetro crítico u_0), afastado $2 \cdot d$, no perímetro crítico u_1 e se necessária armadura de punção deve ser verificado o perímetro crítico u_{out} .

2.1.2.1 VERIFICAÇÃO DA COMPRESSÃO DIAGONAL DO CONCRETO

Do item 6.4.5 (3) da norma mais atualização a tensão resistente de cálculo do concreto é dado por:

$$v_{Rd,m\acute{a}x} = 0,4 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (2.16)$$

Onde v é dado por:

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (2.17)$$

Sendo o f_{ck} dado em MPa.

Para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq 0,24 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} \cdot u_0 \cdot d = V_{Rd,max} \quad (2.18)$$

Em uma análise experimental, a carga resistente característica é calculada por:

$$F_{Sk} \leq 0,24 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{ck} \cdot u_0 \cdot d = V_{Rk,m\acute{a}x} \quad (2.19)$$

2.1.2.2 VERIFICAÇÃO DA TRAÇÃO DIAGONAL

Do item 6.4.4 quando não há armadura de punção a verificação da tensão resistente do concreto pode ser expressa por:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \quad (2.20)$$

Onde:

f_{ck} : está em MPa;

$$k = 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \leq 2,0 \quad d \text{ em cm}, \quad (2.21)$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (2.22)$$

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_{1x} + \rho_{1z}} \leq 0,02, \quad (2.23)$$

Sendo:

γ_c coeficiente de minoração da resistência do concreto, igual a 1,4;

k é o *size effect* sendo ≤ 2 .

Para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \cdot (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d = V_{Rd,c} \quad (2.24)$$

Em uma análise experimental, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sk} \leq 0,18 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}}\right) \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d = V_{Rk,c} \quad (2.25)$$

Caso o concreto não resista aos esforços solicitantes, deve ser adotada armadura de punção sendo a equação representada em seguida (Item 6.4.5 da norma):

$$v_{rd,cs} = 0,75 \cdot v_{rd,c} + 1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \sin\alpha}{u_1 \cdot d} \leq k_{m\acute{a}x} \cdot v_{rd,c} \quad (2.26)$$

Onde:

A_{sw} : Área de aço da armadura de punção em um perímetro crítico;

S_r : Espaçamento radial entre as barras de aço de punção;

$f_{ywd,ef}$: menor valor entre “250 + 2,5d” e f_{ywd} , com d em centímetros.

$k_{m\acute{a}x}$: Fator que limita a capacidade máxima alcançada pela aplicação da armadura de punção.

Para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq \left[0,75 \cdot v_{Rd,c} + 1,5 \cdot \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{sw} \cdot f_{ywd,ef} \left(\frac{1}{u_1 d} \right) \sin \alpha \right] \cdot u_1 \cdot d = V_{Rd,cs} \quad (2.27)$$

Em uma análise experimental, a carga resistente característica é calculada por:

$$F_{Sk} \leq \left[0,135 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \cdot (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 1,5 \cdot \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{sw} \cdot f_{ywk,ef} \left(\frac{1}{u_1 d} \right) \sin \alpha \right] \cdot u_1 \cdot d = V_{Rk,cs} \quad (2.28)$$

2.1.2.3 VERIFICAÇÃO DA REGIÃO EXTERNA AS ARMADURAS DE PUNÇÃO

Do item 6.4.5 (4), as armaduras de punção devem ser dispostas de maneira que, no perímetro de controle externo u_{out} ou $u_{out,ef}$, apenas o concreto seja suficiente para resistir à punção.

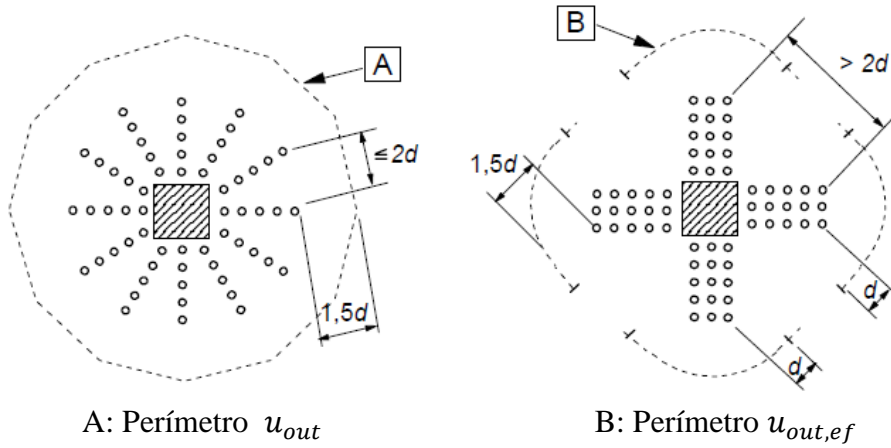


Figura 13 - Perímetro de controle para pilares internos, [EUROCODE 2 (2004) – FIGURA 6.22]

Para verificação no perímetro u_{out} aplica-se as mesmas premissas da seção 6.4.4 da norma, portanto para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \cdot (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d = V_{Rd,out} \quad (2.29)$$

Em uma análise experimental, a carga resistente característica é calculada por:

$$F_{Sk} \leq 0,18 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \cdot (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d = V_{Rk,out} \quad (2.30)$$

2.1.3 ACI 318 (2014)

A seção 22.6 desta norma trata do cálculo de lajes à punção

2.1.3.1 VERIFICAÇÃO DA COMPRESSÃO DIAGONAL DO CONCRETO

Segundo o ACI no item 22.6.6.2 a altura útil deve ser projetada para que a resistência última de concreto v_u não exceda os valores:

Tabela 1 - Armadura de punção segundo o ACI

Armadura	Máxima v_u no perímetro crítico (u_0)
Estribos	$\phi 0,5\sqrt{f_c'}$

Onde:

u_0 : é o perímetro crítico, $d/2$ da face do pilar;

f_c' : é a tensão resistente a compressão do concreto, dada em MPa;

d : é a altura útil da laje, em metros. $d = (dx + dy)/2$

Na Figura 14 são apresentados os perímetros críticos e armaduras de punção para o pilar de centro utilizado nesta pesquisa.

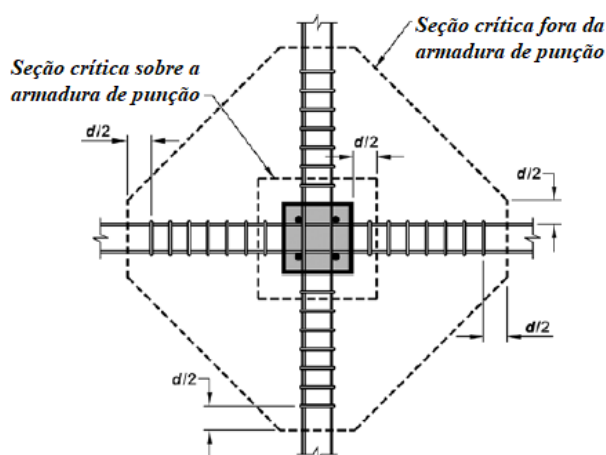


Figura 14 - Representação dos perímetros críticos e armaduras de punção. (Modificado – ACI 318M (2014), Figura. R22.6.4.2)

2.1.3.2 VERIFICAÇÃO DA TRAÇÃO DIAGONAL

Segundo o ACI no item 22.6.5.2, quando não há armadura de punção, a carga resistente característica do concreto é verificada pelo menor valor das expressões:

$$F_{sk} \leq \begin{cases} 0,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_0 \cdot d \\ 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_0 \cdot d \\ 0,083 \cdot \left(2 + \frac{\alpha s \cdot d}{b_0}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_0 \cdot d \end{cases} = V_{Rk,c} \quad (2.31)$$

Onde:

β é a razão entre a maior e a menor dimensão do pilar;

λ vale 1,0 para concretos de densidade normal.

αs vale 40 para pilares internos, 30 para pilares de borda e 20 para pilares de canto.

Para uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq \begin{cases} 0,33\phi\lambda\sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \\ 0,17\phi\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)\lambda\sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \\ 0,083\phi\left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_0}\right)\lambda\sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \end{cases} = V_{Rd,c} \quad (2.32)$$

Caso o concreto não resista aos esforços devem ser utilizadas armaduras de punção. Quando há armadura de punção a força resistente pode ser expressa pelo menor dos dois valores abaixo:

Para utilização de estribo em uma análise experimental:

$$F_{sk} \leq \begin{cases} \left(0,17 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot (\sin(\alpha) + \cos(\alpha))}{u_0 \cdot s}\right) \cdot u_0 \cdot d \\ \left(0,5 \cdot \sqrt{f'_c}\right) \cdot u_0 \cdot d \end{cases} \quad (2.33)$$

Onde:

d é a altura útil da laje, em metros. $d=(dx+dy)/2$;

f'_c é a resistência característica à compressão do concreto, em MPa, limitado a 69 MPa; f_c

f_{yt} é a tensão de escoamento característica do aço das armaduras de punção, em MPa, limitado a 420 MPa;

β é a razão entre a maior e a menor dimensão do pilar;

λ vale 1,0 para concretos de densidade normal;

α_s vale 40 para pilares internos, 30 para pilares de borda e 20 para pilares de canto;

s é a distância entre armaduras de punção em uma mesma linha, em metros, limitado ao máximo de $0,5d$.

A_v é a área da seção transversal das armaduras de punção de uma camada, em metros²;

α é o ângulo de inclinação entre o eixo da armadura de punção e o plano da laje;

Para utilização de estribo, em uma análise de projeto:

$$F_{sk} \leq \begin{cases} \left(0,17 \cdot \phi \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot (\sin(\alpha) + \cos(\alpha))}{u_0 \cdot s} \right) \cdot u_0 \cdot d \\ (0,5 \cdot \phi \cdot \sqrt{f'_c}) \cdot u_0 \cdot d \end{cases} \quad (2.34)$$

2.1.3.3 VERIFICAÇÃO DO CONTORNO EXTERNO ÀS ARMADURAS DE PUNÇÃO

As armaduras de punção devem ser dispostas de forma que, apenas o concreto seja suficiente para resistir à punção no perímetro de controle externo a u_{out} . No perímetro externo à armadura de punção deve-se verificar:

Em uma análise experimental, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sk} \leq 0,17\lambda\sqrt{f'_c} \cdot b_{out} \cdot d = V_{Rk,out} \quad (2.35)$$

Em uma análise de projeto, a carga resistente é calculada por:

$$F_{Sd} \leq 0,17\phi \cdot \lambda\sqrt{f'_c} \cdot b_{out} \cdot d = V_{Rd,out} \quad (2.36)$$

2.2 – TRABALHOS ANTERIORES

2.2.1 - CALDENTEY, LAVASELLI, PEIRETTI, FERNÁNDEZ (2013)

Em seu trabalho o grupo de pesquisas em concreto armado da Universidade Politécnica de Madri realizou ensaios de resistência a punção em 8 lajes lisas de concreto armado. As duas primeiras lajes foram armadas somente com armaduras de flexão servindo de referência, as lajes 3 e 4 foram armadas com estribos sem ancoragem na armadura de flexão, sendo somente apoiados e fixados na armadura de compressão através de arame, uma prática não recomendada por norma, porém muito utilizado em alguns países incluído a Espanha. As lajes 5 e 6 foram armadas com armaduras de punção devidamente ancorados nas armaduras de flexão, prática prescrita pelas normas. As lajes 7 e 8 tiveram as mesmas prescrições das lajes 5 e 6, sendo a diferença a interrupção das armaduras de flexão na seção do pilar e colocados armaduras adicionais nas regiões próximo ao pilar. A Figura 15 mostra as armaduras de punção devidamente ancoradas na armadura de flexão, segundo as prescrições normativas.

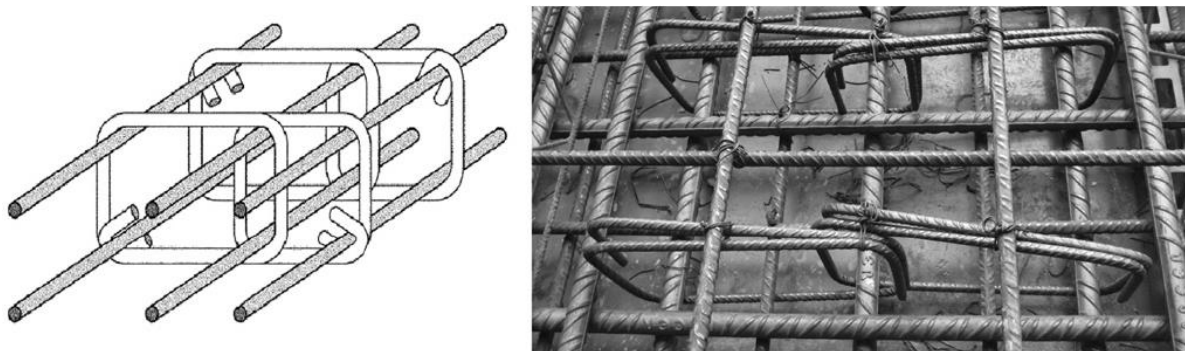


Figura 15 – Armadura de punção ancorada na armadura de flexão.

A Figura 16 apresenta armaduras de estribos não ancoradas, sendo somente apoiada na armadura de flexão, uma prática que não segue as prescrições normativas, adotados em alguns países.

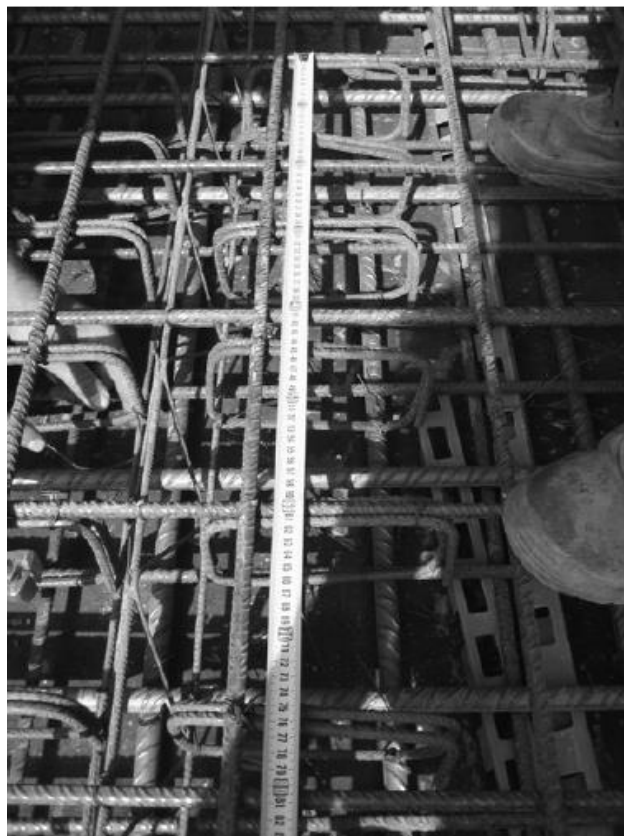


Figura 16 - Armadura de punção sem envolver a armadura de flexão.

Os pesquisadores tiveram como objetivos principais avaliar os resultados de resistência à punção em lajes lisas de concreto armado, avaliando a influência que diferentes disposições de ancoragem têm sobre a punção e comparar os resultados experimentais com os resultados teóricos de acordo com as normas: ACI 318-08, EUROCODE 2:2004, FIB 2010 e EHE-2008.

Todas as lajes tinham dimensões de 2,80 m x 2,80 m x 0,25 m, sendo apoiadas em oitos pontos de apoio, dispostos em uma circunferência de 1,25 m de raio e ângulo de 45 graus. A carga foi aplicada nas lajes no sentido da gravidade no topo do pilar por meio de 4 macacos hidráulicos.

Os pesquisadores utilizaram armaduras de flexão de 20 milímetros de diâmetro espaçados de 20 centímetros, mesclados com barras de 12 milímetros espaçados a cada 20 centímetros. As armaduras de punção utilizadas nas lajes 3 a 8 foram compostas por estribos fechados de 8 milímetros de diâmetros espaçados a cada 15 centímetros. Sendo todas as lajes projetadas para romper a punção.

A Figura de 17 representa as dimensões e detalhes das lajes ensaiadas pelos pesquisadores.

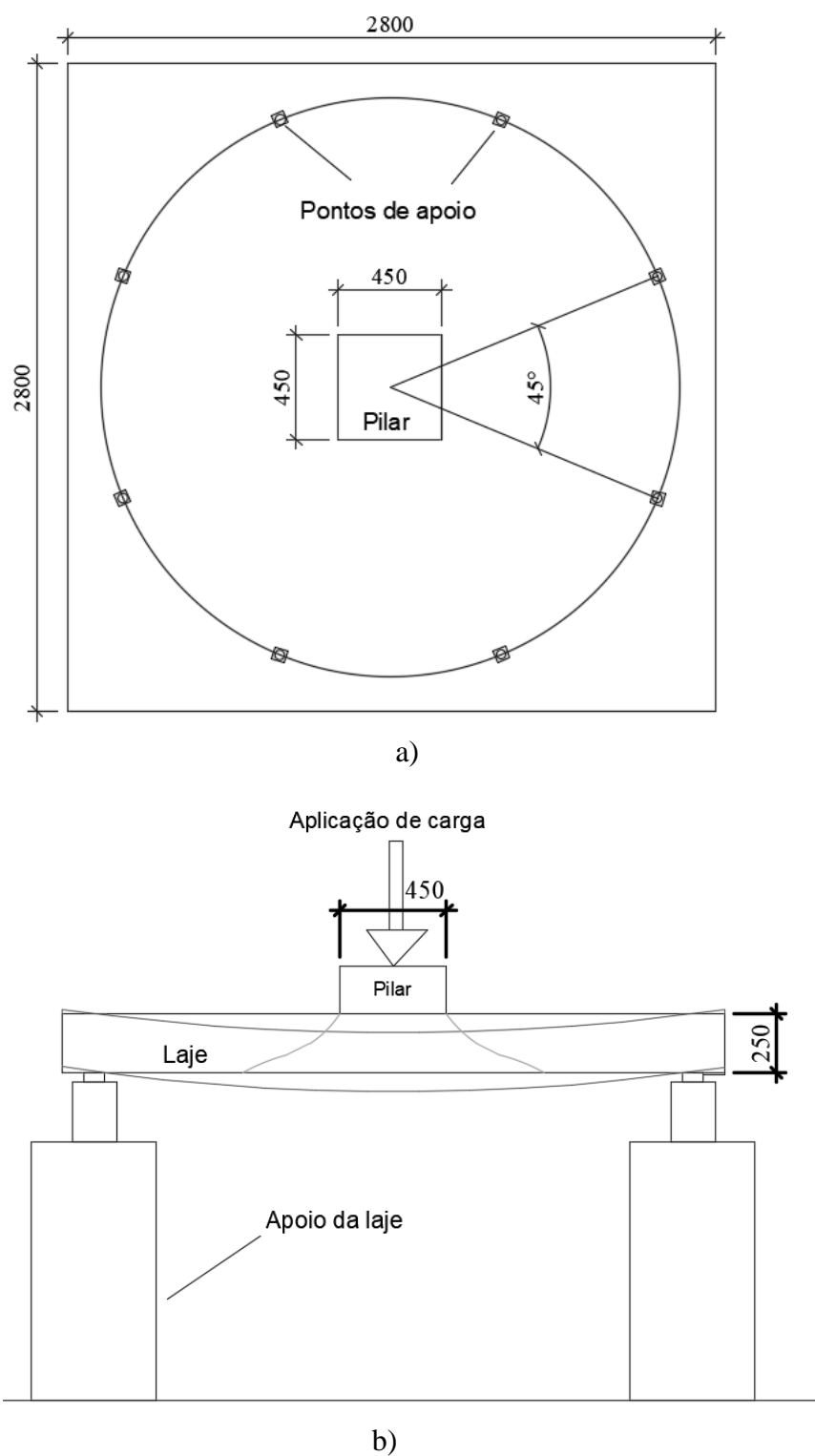


Figura 17 - Representação da montagem e detalhe das lajes; a) Disposição dos apoios da laje; b) Detalhes dos apoios das lajes

Na Figura 18 os pesquisadores apresentam as disposições das lajes sem armadura de punção.

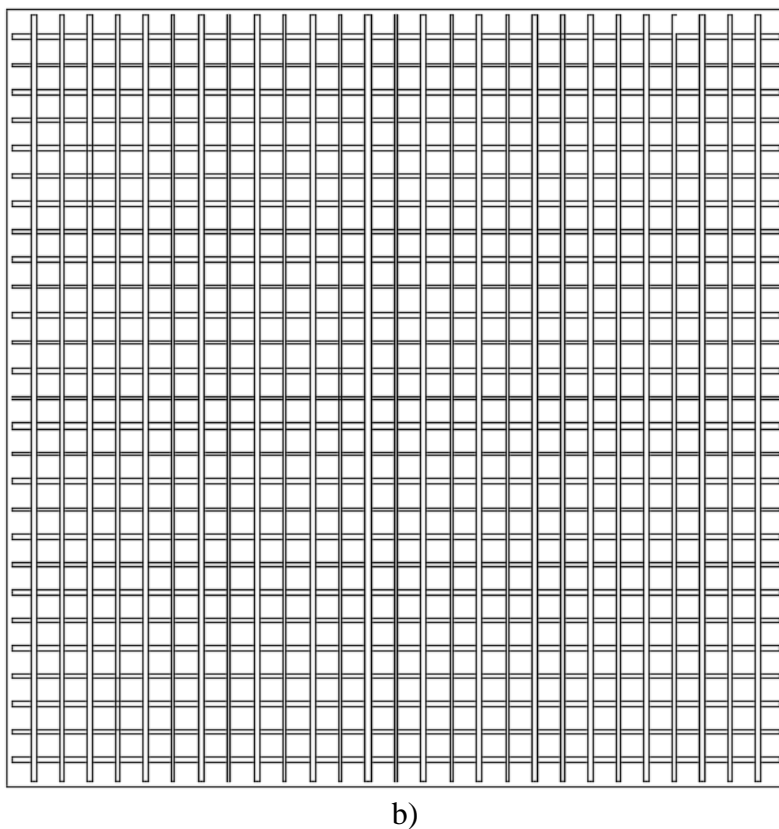
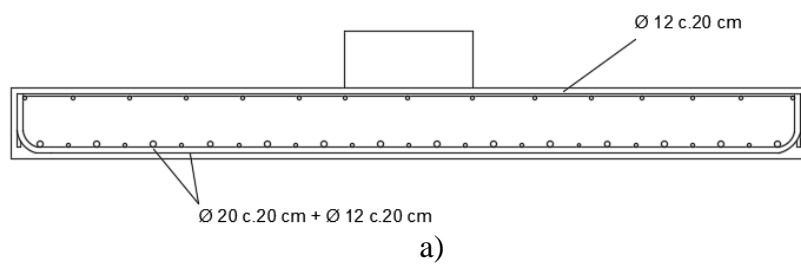
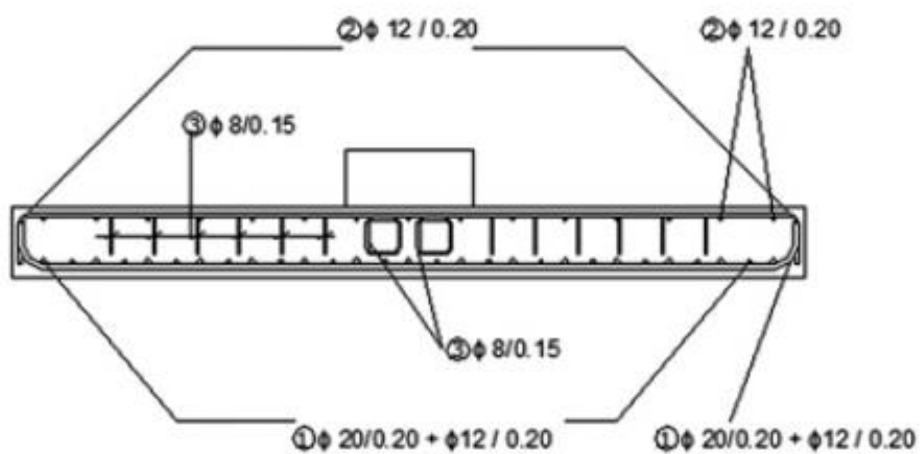
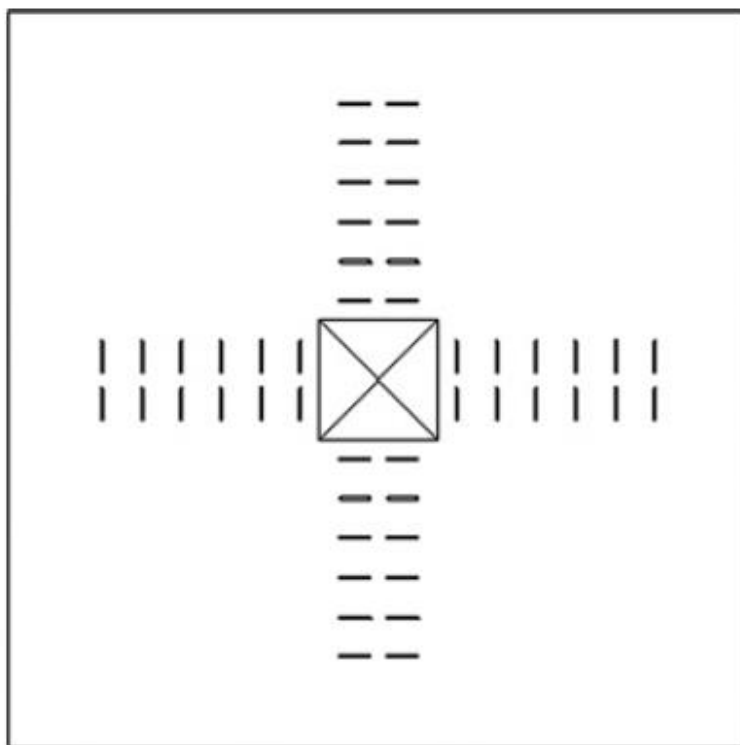


Figura 18 - Disposição das lajes 1 e 2 sem armadura de punção; a) Detalhamento da armadura longitudinal; b) Camada tracionada da armadura de flexão.

A Figura 19 estão dispostas as armaduras de flexão e punção das lajes 3 e 4.



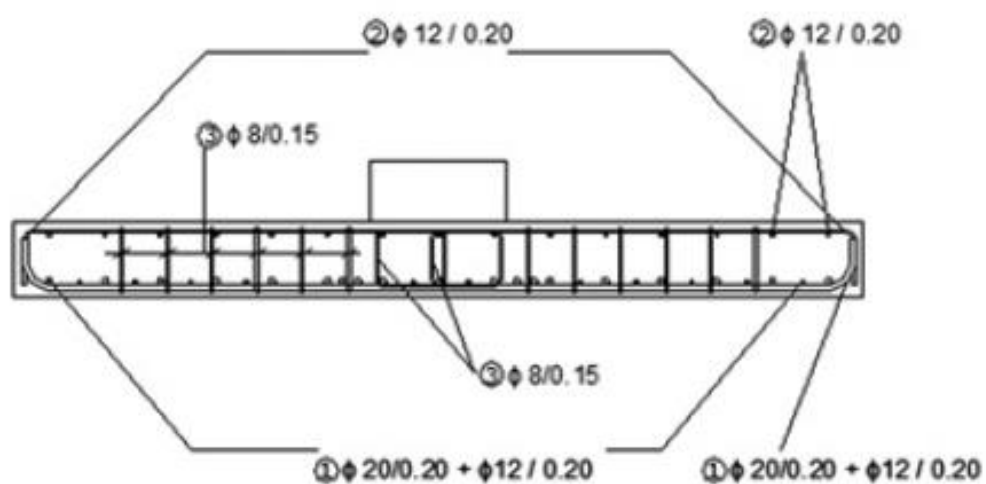
a)



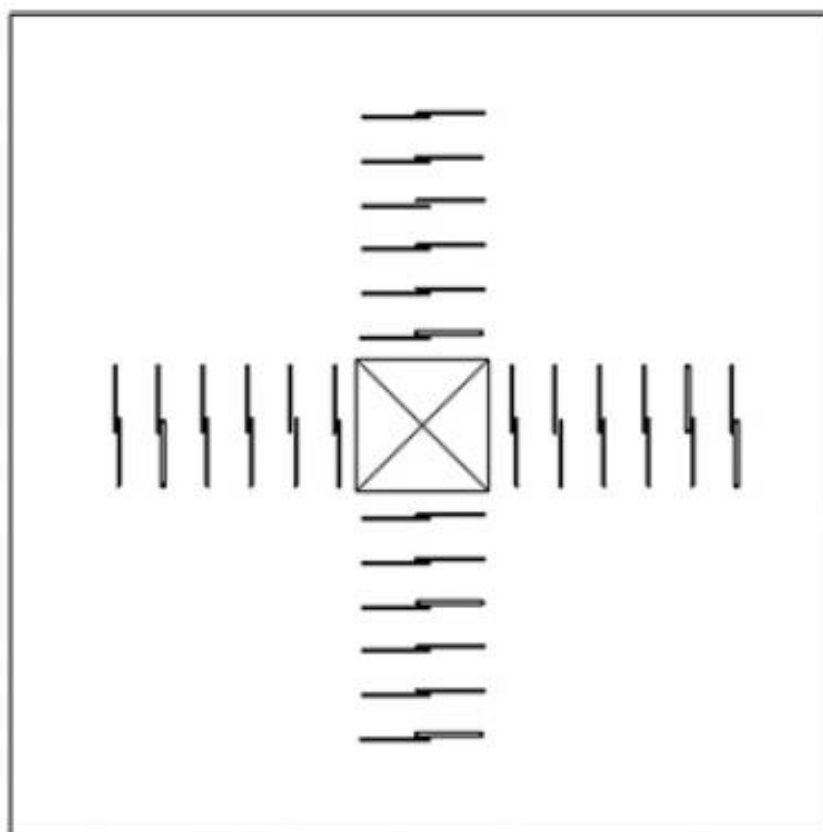
b)

Figura 19 - Detalhes das lajes 3 e 4 com armadura de punção sem ancoragem a) Disposição dos estribos em corte, b) Disposição dos estribos em planta

A Figura 20 mostra a disposição das armaduras de flexão e punção das lajes 5 e 6.



a)



b)

Figura 20 - Detalhes das lajes 5 e 6 com estribos devidamente ancoradas; a) Disposição dos estribos em corte; b) Disposição dos estribos em planta

A Figura 21 apresenta as disposições das armaduras das lajes 7 e 8.

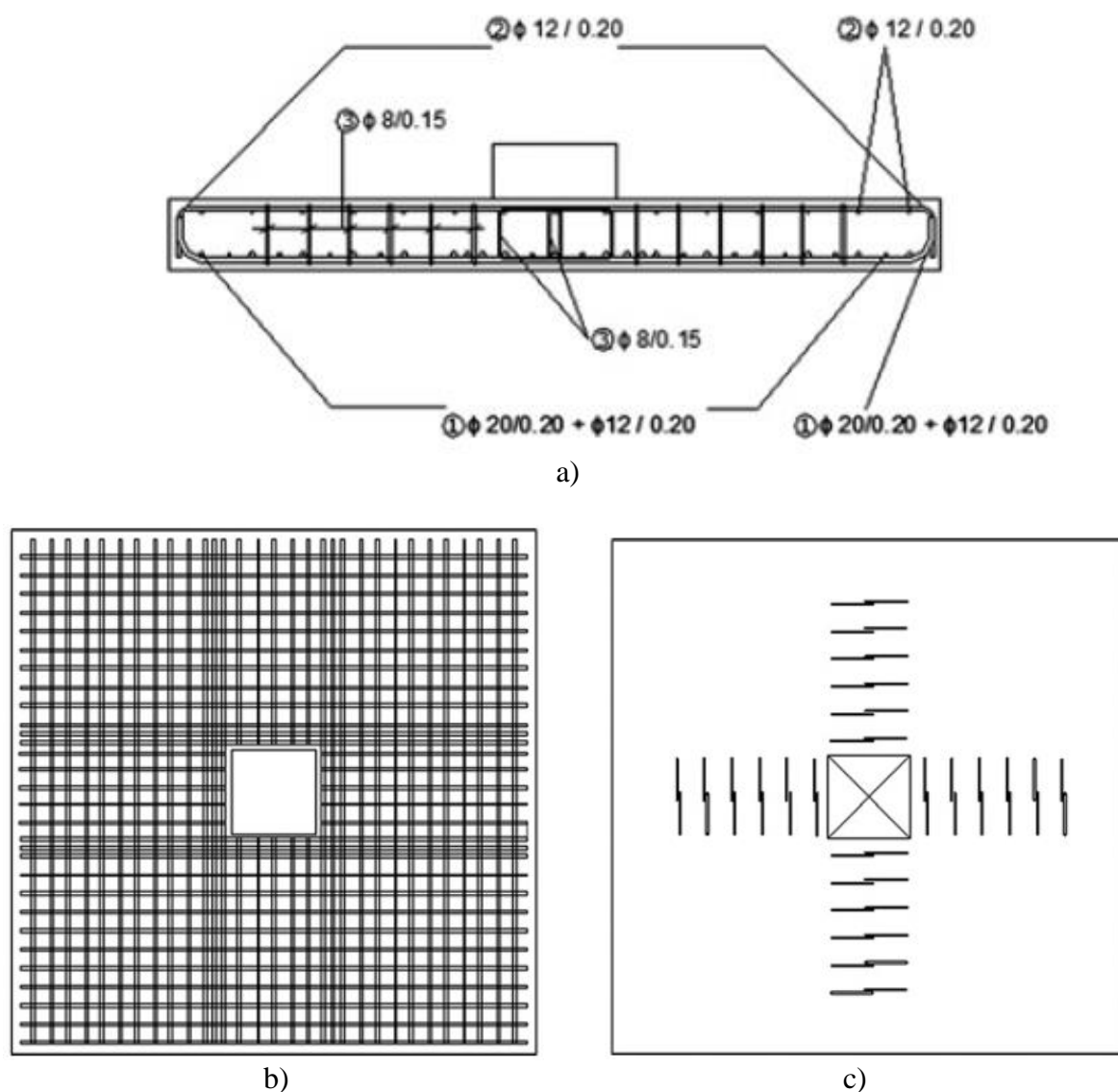


Figura 21 - Detalhas das lajes 7 e 8 com estribos devidamente ancorados a) Disposição em corte; b) Vista mostrando a interrupção das armaduras de flexão no pilar; c) Detalhes da armadura de punção devidamente ancorados

Os ensaios foram acompanhados por 8 células de carga, 16 deflexômetros, 4 inclinômetros e 6 extensômetros.

Os resultados obtidos experimentalmente pelos pesquisadores foram comparados com resultados teóricos normativos e estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados teóricos e práticos do experimento a punção

Lajes	Carga experimental (kN)	ACI 318-08	$\frac{P_{exp}}{P_{ACI}}$	EHE-08	$\frac{P_{exp}}{P_{EHE-08}}$	EC-2	$\frac{P_{exp}}{P_{EC-2}}$
1	973,57	1057,58	0,92	1060,61	0,92	1060,61	0,92
2	955,57	1063,38	0,90	1064,49	0,90	1064,49	0,90
	Valores médios	-	0,91	-	0,91	-	0,91
3	1148,57	976,82	1,18	1443,09	0,80	1282,13	0,90
4	1252,57	981,54	1,28	1447,80	0,87	1286,84	0,97
5	1148,57	980,81	1,17	1447,07	0,79	1286,11	0,89
6	1202,57	978,03	1,23	1444,29	0,83	1283,33	0,94
	Valores médios	-	1,21	-	0,82	-	0,92
7	1050,58	979,08	1,07	1445,34	0,73	1284,38	0,82
8	1002,58	982,16	1,05	1488,41	0,69	1287,45	0,78
	Valores médios	-	1,05	-	0,71	-	0,80

Para o cálculo da carga da punção pelo FIB – 2010 os pesquisadores utilizaram as duas formulações prescritas, utilizando os valores de inclinação medidos no experimento e aproximados por uma equação empírica, os valores estão prescritos a seguir.

Tabela 3 - Resultados teóricos e práticos do experimento a punção

Lajes	Carga experimental (kN)	FIB-MC 2010 - inclinação teórica	$\frac{P_{exp}}{P_{FIB}}$	FIB-MC 2010 – inclinação exp.	$\frac{P_{exp}}{P_{FIB}}$
1	973,57	995,54	0,98	1059,82	0,92
2	955,57	1001,00	0,95	1071,76	0,89
	Valores médios	-	0,97	-	0,91
3	1148,57	1195,53	0,96	1256,56	0,91
4	1252,57	1203,30	1,04	1254,47	1,00
5	1148,57	1202,09	0,96	1264,16	0,91
6	1202,57	1197,52	1,00	1250,56	0,96
	Valores médios	-	0,99	-	0,95
7	1050,58	1199,24	0,88	1279,17	0,82
8	1002,58	1204,31	0,83	1298,91	0,77
	Valores médios	-	0,85	-	0,80

Os pesquisadores concluíram que a armadura de punção sem ancoragem na armadura de flexão principal (lajes 3 e 4), prática usual na Espanha e em alguns países, apresentam resultados similares as lajes com armaduras de punção devidamente ancoradas especificados nas normas (lajes 5 e 6), mostrando que os estribos sem ancoragem são eficientes no controle de fissuras de punção, aumentando a resistência a punção da laje. Esses resultados são importantes, pois a ancoragem dos estribos na armadura de flexão é de difícil execução em obra.

Os resultados também mostram uma redução significativa cerca de 15% na carga última de punção quando as barras longitudinais são interrompidas na área do pilar, representados pelas lajes 7 e 8.

Todas as lajes mostraram um comportamento de rigidez e flexão muito semelhantes, sendo as lajes sem armadura de punção com cargas últimas semelhantes às prescrições de norma.

Quanto às prescrições normativas o ACI mostrou se conservador para as lajes com armadura de punção, sendo os demais códigos utilizados menos conservadores.

2.2.2 - BARTOLAC, DUVNJAK, DAMJANOVIĆ (2015)

Em seu trabalho os pesquisadores estudaram o comportamento a punção de lajes lisas de concreto armado. Para a pesquisa foram testadas 6 lajes lisas, sendo 3 lajes contendo somente armadura de flexão tracionada e comprimida denominadas S2-1, S2-2, S2-3 e 3 lajes com armadura de flexão e punção denominadas S1-1, S1-2 e S1-3. Para que as lajes rompam por punção os pesquisadores utilizaram uma taxa de armadura de flexão de 1,5%, com diâmetros de 14 mm espaçados de 11 cm, valores acima dos utilizados na prática.

A Figura 22 representa como foram dispostas as armaduras de flexão das lajes.

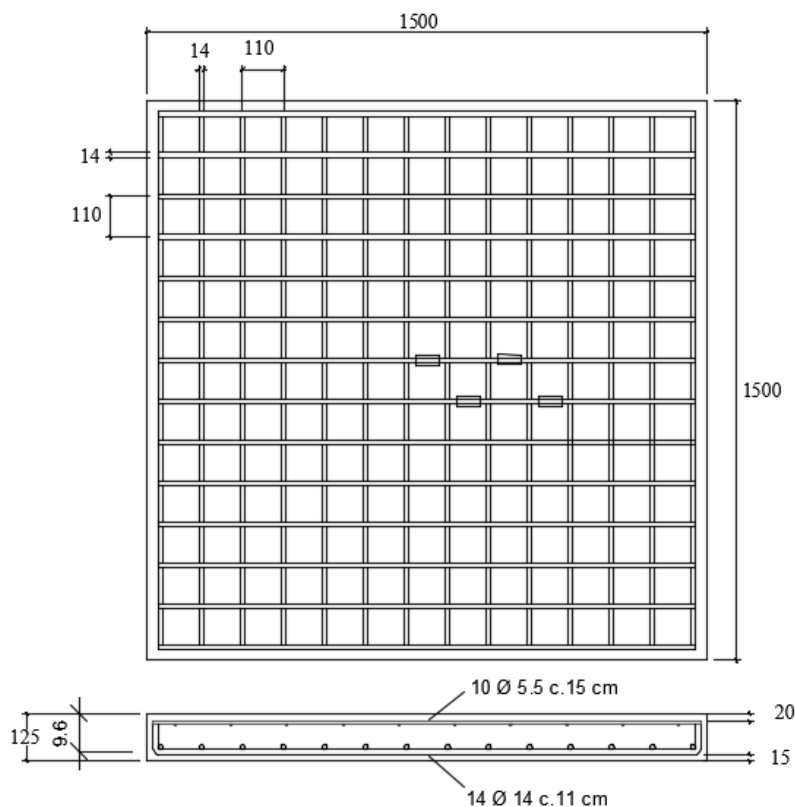
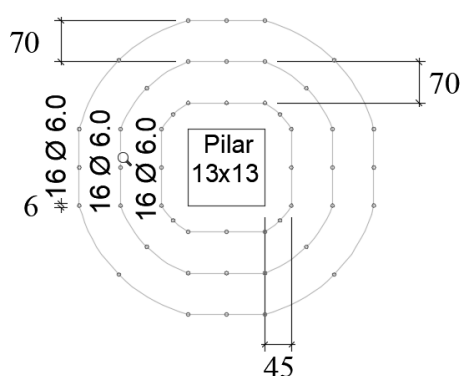


Figura 22 - Disposição das armaduras de flexão e posição dos extensômetros (dimensões em milímetros)

Quatro extensômetros foram instalados na armadura de flexão de tração para medição das deformações e esses valores no momento da ruptura são os indicadores de rompimento da laje, se foi por punção ou não segundo os autores.

Os pesquisadores estabeleceram a armadura de punção de acordo com cálculos utilizando o EUROCODE 2 (2004) dispoindo em três perímetros, como representado na Figura 23.



a)



b)



c)

Figura 23 - a) Disposição das armaduras de punção, b) Armadura de punção montada, c) Detalhamento da armadura de punção, (<https://www.researchgate.net/publication/282097318>)

Para rompimentos das lajes os pesquisadores utilizaram 8 cilindros de aço como apoio para as lajes, dispostos em um raio de 75 cm do centro da laje, então foi aplicada uma carga continuamente no sentido da gravidade até o rompimento das lajes. Na Figura 24 os pesquisadores apresentam a montagem do experimento e a parte tracionada de uma laje após o experimento.

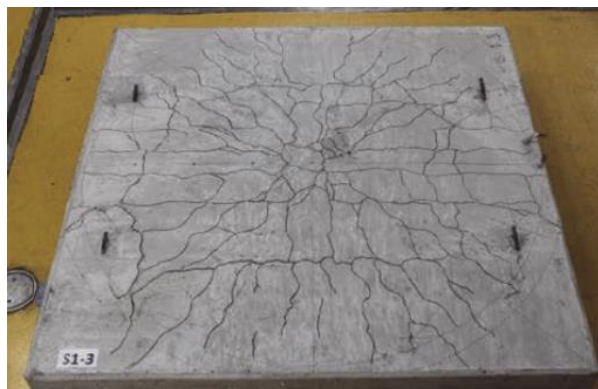


Figura 24 - a) montagem do experimento; b) laje após a ruptura (na Figura é mostrada a parte tracionada), (<https://www.researchgate.net/publication/282097318>)

Para instrumentação das lajes os pesquisadores utilizaram 12 *linear variable differential transformers* (LVDTs) para medição dos deslocamentos verticais na parte superior e inferior das lajes, sendo que 8 LVDT's foram dispostos na parte superior e 4 na parte inferior. 2 LVDT's foram dispostos transpassando a laje para medição da variação de altura durante o experimento.

Foram medidos também as deformações radiais com a utilização de 4 sensores indutivos, sendo fixados apenas na zona de compressão das lajes. Segundo os pesquisadores a ocorrência de descompressão nesses pontos indica um desenvolvimento das fissuras de punção.

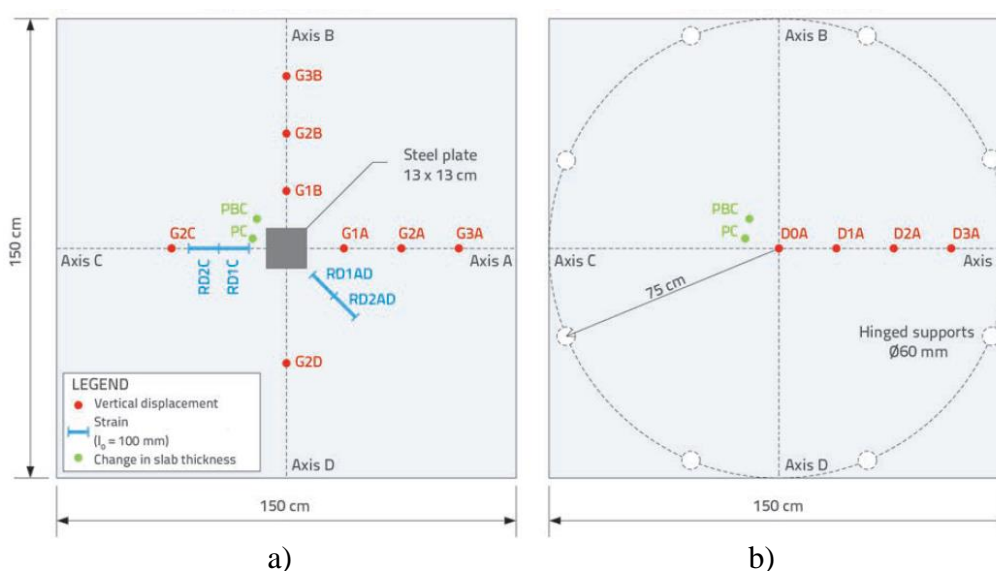


Figura 25 - Vista em planta dos pontos de medição das lajes; a) Lado superior; b) lado inferior, (<https://www.researchgate.net/publication/282097318>).

Os resultados experimentais obtidos pelos pesquisadores foram comparados com os modelos teóricos normativos do EUROCODE 2, ACI 318 e FIB 2010. Os resultados experimentais e normativos obtidos na pesquisa estão representados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Lajes com armadura de punção

Laje	Fc (MPa)	Vexp [kN]	V_{EC2} [kN]	V_{ACI} [kN]	V_{MC} [kN]	$\frac{V_{EXP}}{V_{EC2}}$	$\frac{V_{EXP}}{V_{ACI}}$	$\frac{V_{EXP}}{V_{MC}}$
S1-1	43,1	393,9	432,1	340,7	377,2	0,91	1,16	1,04
S1-2	45,2	361,3	435,0	342,7	376,3	0,83	1,05	0,94
S1-3	42,7	385,2	431,6	340,3	385,1	0,89	1,13	1,00
Valor médio						0,88	1,11	0,99

Tabela 5 - Lajes sem armadura de punção

Laje	Fc (MPa)	Vexp [kN]	V_{EC2} [kN]	V_{ACI} [kN]	V_{MC} [kN]	$\frac{V_{EXP}}{V_{EC2}}$	$\frac{V_{EXP}}{V_{ACI}}$	$\frac{V_{EXP}}{V_{MC}}$
S2-1	43,1	345,2	243,3	176,8	174,6	1,42	1,95	1,98
S2-2	45,2	303,3	240,8	174,0	192,5	1,26	1,74	1,58
S2-3	42,7	328,4	242,2	175,6	184,4	1,36	1,87	1,78
Valor médio						1,35	1,85	1,78

Analisando os resultados os pesquisadores chegaram as seguintes conclusões:

A capacidade de deformação das lajes com armadura de punção é maior se comparados com as lajes sem armadura de punção cerca de 36%. Observa se também um aumento das tensões de cisalhamento em cerca de 17% nas lajes com armadura de punção.

A descompressão na zona de compressão começa antes da ruptura nas lajes sem armadura de punção. Nas lajes com armadura de punção, estas mudam a forma de ruptura.

Após os experimentos os pesquisadores cortaram uma laje com armadura de punção (S1-1) e uma laje sem armadura de punção (S2-S), como representado na Figura 26.



Figura 26 - Corte mostrando os cones de punção nas lajes

Os pesquisadores concluíram, como pode ser verificado na Figura 26, que a armadura de punção na laje S1-1 diminuiu o ângulo do cone de punção se comparado com a laje S2-2 de cerca de 45 graus para aproximadamente 15 graus, ou seja uma maior área da laje passou a ser solicitada para resistir a força aplicada.

Conclusões da pesquisa

Lajes sem armadura de punção:

Todos os modelos teóricos (EUROCODE 2, ACI 318 e FIB 2010) são bastante conservadores para determinação da carga última de punção, sendo o ACI o mais conservador, seguido pelo FIB.

Lajes com armadura de punção:

O ACI 318 teve uma boa estimativa da carga de ruptura das lajes com cerca de 11% a favor da segurança. Quanto ao FIB 2010 os resultados foram muito próximos da carga e ruptura da laje, tendo um valor de 1% contra a segurança. O EUROCODE 2 os resultados deram acima dos obtidos experimentalmente, cerca de 12% contra a segurança. De acordo com os autores, apesar do EUROCODE ser contra a segurança os pesquisadores concluíram que os valores são satisfatórios devido a razões de segurança que segue este modelo de cálculo.

2.2.3 TRAUTWEIN (2006)

Em seu trabalho o pesquisador investigou a resistência à punção de lajes lidas de concreto em pilares de centro de edifícios, utilizando armadura de punção tipo “*stud*” sem envolver a armadura de flexão.

Foram ensaiadas 11 lajes, sendo 5 classificadas como grupo 01 (denominados de E) e 6 classificadas como grupo 2 (denominado de I). As lajes do grupo 01 foram dimensionadas para romper externamente as armaduras de punção e as lajes do grupo 02 foram dimensionadas para romper dentro da armadura de punção. Nas lajes do grupo 01 as principais variáveis são: Forma de distribuição das armaduras de punção, pinos e ganchos em forma de “U” utilizados na parte inferior da armadura de punção. As lajes do grupo 02 as principais variáveis são: Diâmetro das armaduras de punção e o número de camadas utilizadas. A Figura 27 representa o esquema de aplicação de cargas utilizado no experimento.

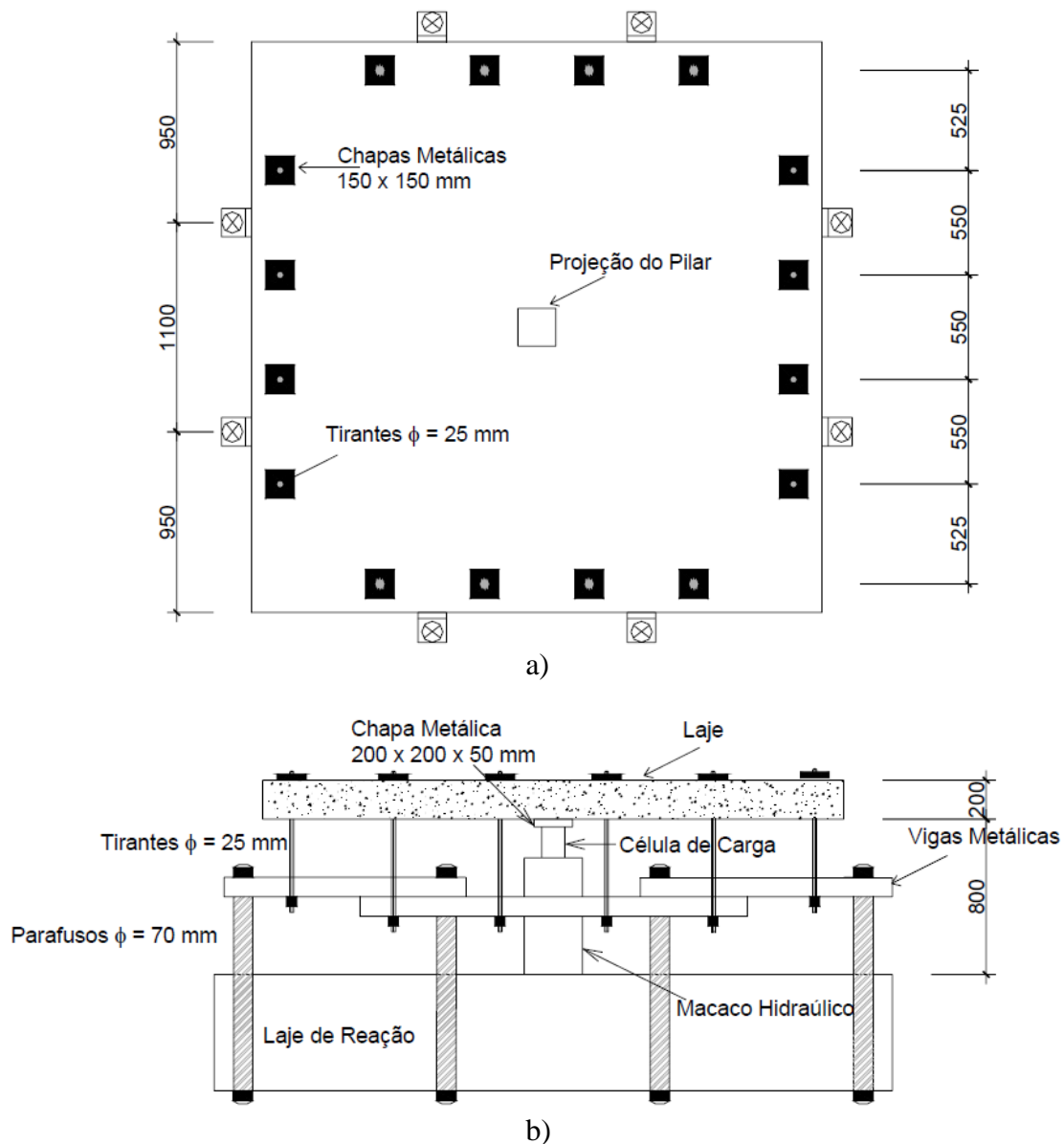


Figura 27 - Sistemas de ações e reações das lajes utilizadas pelo pesquisador, a) Em planta, b) Em perfil.

O pesquisador ensaiou lajes quadradas de 3000 mm e altura de 200 mm, sendo a altura útil da laje definida em 164 mm. Para o concreto foi utilizado resistência a compressão em torno de 40 MPa, aos 14 dias. A armadura de flexão tracionada foi composta de 31 barras de 16 mm (CA-50) em cada direção espaçadas em 10 cm e a armadura de flexão comprimida composta de 21 barras de 8 mm (CA-50) em cada direção espaçadas de 15 cm. Foram utilizadas também 31 barras em forma de U com 12,5 mm de diâmetro em cada lado da laje para ancorar a armadura de flexão principal. Foi utilizado taxa de armadura de 1,26% para garantir que a ruptura ocorresse por punção. Nas Figuras 28 temos o detalhamento da armadura de flexão.

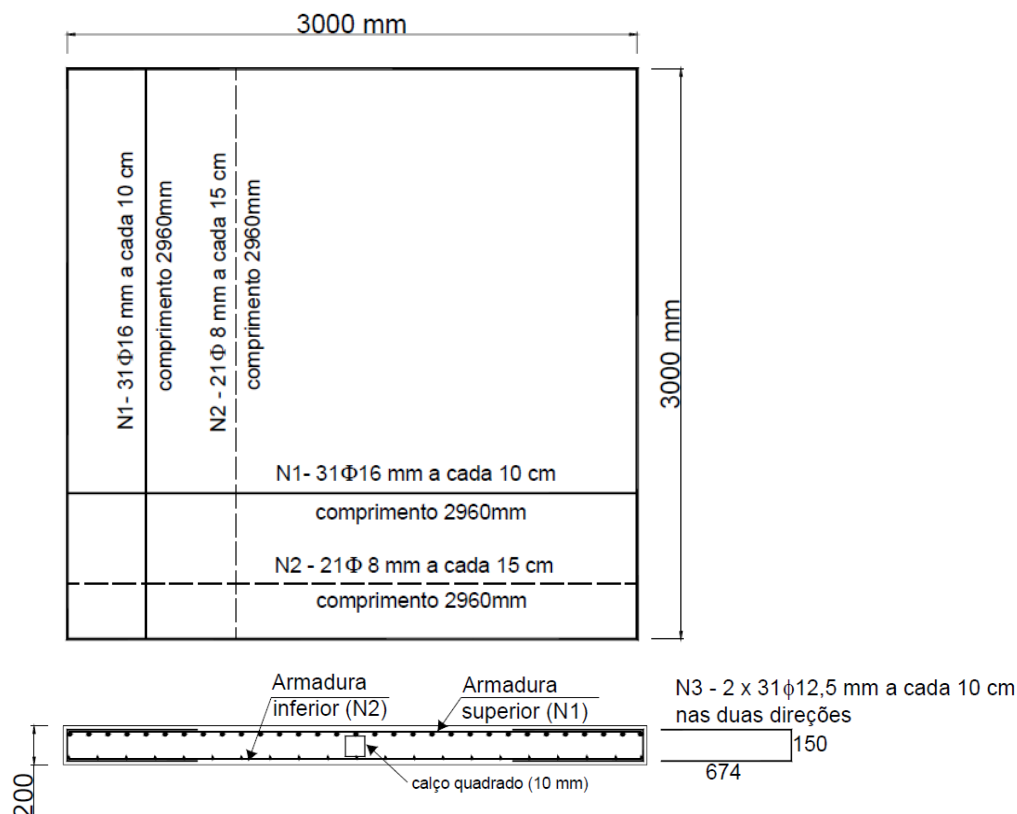


Figura 28 - Detalhamento da armadura de flexão, a) Desenho em planta, b) Desenho em corte.

Para a armadura de punção o pesquisador utilizou barras de aço CA-50 de comprimento 95 mm que foram soldados em suas extremidades a chapas de aço de 30 mm de largura e 10 mm de espessura, ficando o *stud* com altura total de 115 mm. A Figura 29 representa a disposição da armadura de punção em relação à flexão.



Figura 29 - Detalhe da armadura de punção, sem ancoragem na armadura de flexão.

Armaduras de punção do grupo 01 – Lajes E1, E2, E3, E4, E5, E6

O pesquisador utilizou armaduras de punção composta por 11 barras espaçadas de 60 mm, com diâmetro de 10 mm totalizando uma área de aço de 942 mm² por camada. Foi utilizada uma alta taxa de armadura induzindo a ruptura ocorrer na região fora da armadura de punção.

Na laje E1, na chapa inferior da armadura de punção, foram soldados pinos de diâmetro 12,5 mm no lado do “stud” com comprimento de 40 mm, fixados 16 mm abaixo da chapa inferior da armadura de punção.

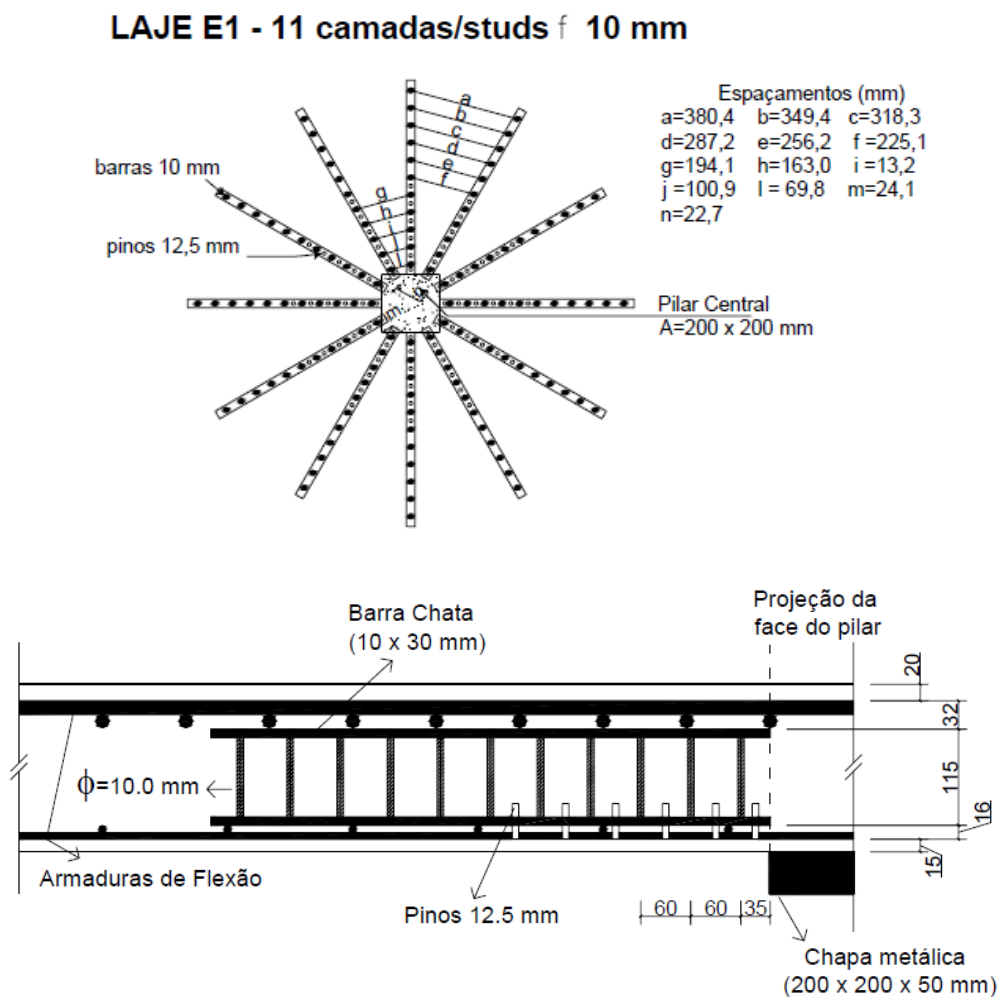


Figura 30 - Detalhe da armadura de punção da laje E1

Na laje E2 as 3 primeiras linhas de *studs*, estavam posicionadas paralelas a face do pilar, sendo a partir da 4 câmara disposta de forma radial, como representado na Figura 31.

LAJE E2 - 11 camadas/studs f 10 mm

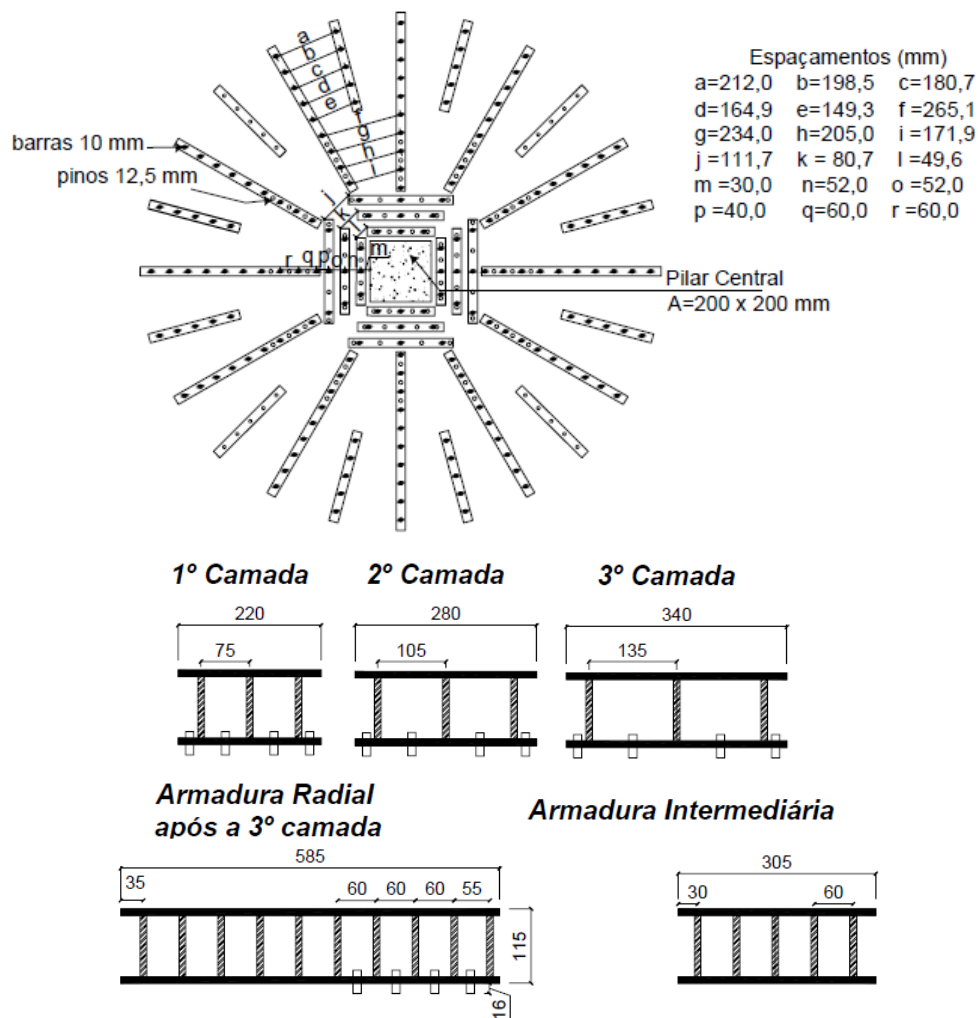


Figura 31 - Detalhe da armadura de punção para a laje E2

Nas lajes de E3 a E5 as armaduras foram distribuídas radialmente a partir da face do pilar, porem os pinos foram substituídos para ganchos em forma de U, composta de barras de 8 mm, comprimento de 50 mm e altura de 55 mm abraçando a armadura de punção na parte inferior. A Figura 32 mostra a disposição desses ganchos.

LAJES E3, E4 e E5 - 11 camadas/studs f 10 mm

LAJES E3 - 3 camadas de gancho U
LAJES E4 - 4 camadas de gancho U
LAJES E5 - 7 camadas de gancho U

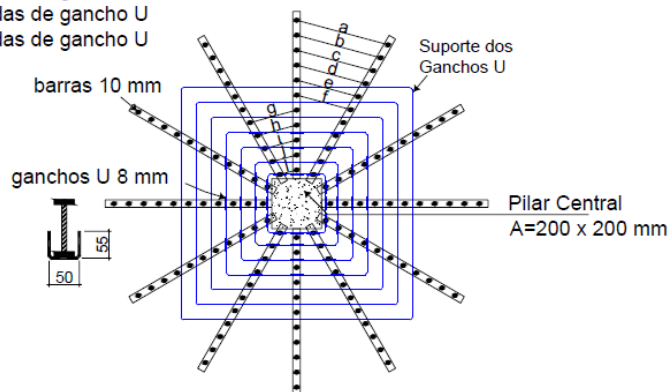


Figura 32 - Continua

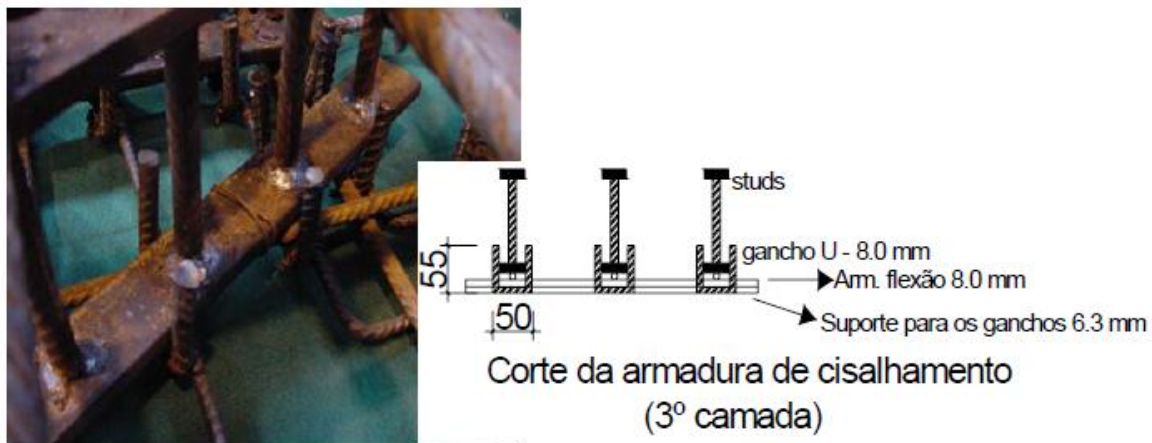


Figura 32 - Detalhamento da armadura de punção das lajes E3, b4 e E5

Armaduras de punção do grupo 02. Lajes I6, I7, I8, I9, I10, I11

Para o grupo 2 o pesquisador ensaiou 6 lajes sendo as variáveis: o número de camadas, o diâmetro, o espaçamento entre as barras e uma densidade de armadura de punção reduzido para que a ruptura ocorra junto ao pilar ou cruzando as armaduras. Os ganchos em forma de U foram mantidos nesse grupo.

Para as lajes I6, I7, I8 o pesquisador utilizou 11 camadas de armadura de punção espaçadas de 60 mm, com 8 camadas de gancho em forma de U (com diâmetro de 8 mm). Os diâmetros das armaduras de punção nessas lajes eram: 6,3 mm para a laje I6, 10 mm para a laje I7 e 8,0 mm para a laje I8.

Para as lajes I9, I10 e I11 o número de camadas da armadura de punção e camadas de gancho em U foi reduzido para 5. Os espaçamentos das barras foram de 80 mm sendo as armaduras de punção variando de: 5 mm na laje I9, 8 mm na laje I10 e 6,3 mm na laje 11.

As Figuras 33 e 34 apresentam os detalhamentos das armaduras de punção utilizado pelo pesquisador no grupo 02.

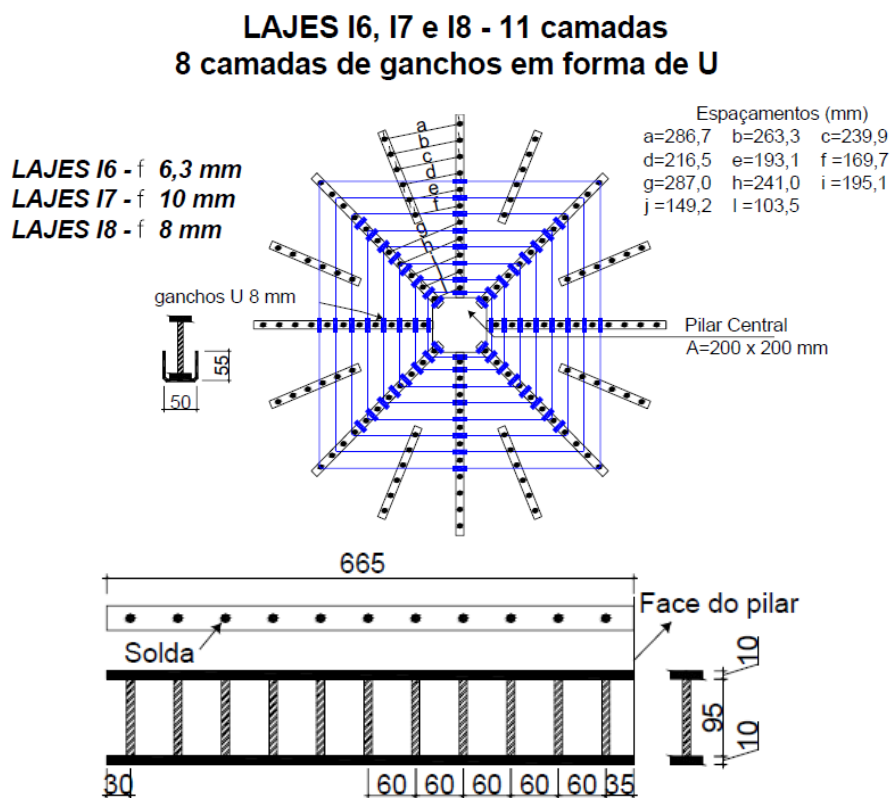


Figura 33 - Armadura de punção da laje I6, I7 e I8

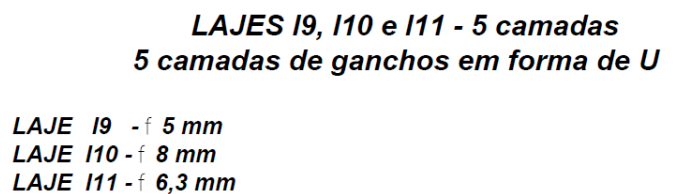


Figura 34 - Armadura de punção das lajes I9, I10 e I11

Tabela 6 - Características das lajes do grupo 02

Laje	Φ (mm)	Número de camadas	Números de camadas Ganchos em U
I6	6,3	11	8
I7	10	11	8
I8	8	11	5
I9	5	5	5
I10	8	5	5
I11	6,3	5	5

Os resultados experimentais obtidos foram comparados entre si e comparados com resultados de outras pesquisas em lajes cogumelo com e sem armadura de punção, semelhantes as deste experimento. O pesquisador fez também uma comparação da carga última experimental com os valores previstos pela ABNT NBR 6118 (2014), ACI-318/02, CEB/MC 90 e EC2/2002. Na Tabela 7 estão representado os dados da pesquisa, sendo G1, G1A, A12, G9, G10 e G11 lajes rompidam em experimentos de outros pesquisadores.

Tabela 7 - Lajes comparadas no experimento (Adaptado).

	Laje	F_c (MPa)	d (mm)	S (mm)	Φ_{Asw}	P_u (kN)
P1	G1	40,2	159	-	-	560
	G1A	41,1	159	-	-	587
	A12	36,5	163	-	-	650
P2	G9	40,0	159	80	12,2	1227
	G10	35,4	154	80	6	800
	G11	34,6	154	80	6,3	907
P3	E1	35,2	159	60	10	1100
	E2	36,6	159	60	10	990
	E3	41,1	159	60	10	1090
	E4	40,6	154	60	10	1205
	E5	42,1	154	60	10	1222
P4	I6	39,1	159	60	6,3	830
	I7	39,6	159	60	10	978
	I8	35,4	159	60	8	856
	I9	43,6	161	80	5	853
	I10	44,4	161	80	8	975
	I11	41,4	161	80	6,3	945

P1 – Lajes sem armadura de punção

P2 – Lajes com armadura de punção ancorada

P3 - Lajes com armadura de punção sem ancorar – uso e pinos e ganchos

P4 - Lajes com armadura de punção sem ancorar – variação de diâmetros e camadas

Tabela 8 - Comparação da carga experimental com as estimativas da NBR-6118/2003									
Laje	$F_{sd1}^{(1)}$ (kN)	$F_{sd2}^{(2)}$ (kN)	$F_{sd3}^{(3)}$ (kN)	$F_{sd1,ext}^{(4)}$ (kN)	V_{cal} (kN)	V_{teste} (kN)	$\frac{V_{teste}}{V_{calculado}}$	Modulo de Ruptura	
								Previsto	Real
E1	434	1039	1458	1019	1019	1100	1,08	Externo	Externo
E2	440	1073	1462	1032	1032	990	0,96	Externo	Interno
E3	457	1179	1476	1073	1073	1090	1,02	Externo	Externo
E4	435	1131	1423	1034	1034	1205	1,17	Externo	Externo
E5	440	1165	1427	1046	1046	1222	1,17	Externo	Externo
I6	450	1133	643	1045	643	830	1,29	Interno	Interno
I7	452	1145	1097	1049	1049	978	0,93	Externo	Interno
I8	435	1044	814	1011	814	856	1,05	Interno	Interno
I9	466	1236	499	843	499	853	1,71	Interno	Interno
I10	469	1254	721	849	721	975	1,35	Interno	Interno
I11	458	1186	576	829	576	945	1,64	Interno	Interno

(1) - Carga para laje sem armadura de cisalhamento;

(2) - Carga para laje com armadura de cisalhamento na superfície adjacente ao pilar (C);

(3) – Carga na superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento (C');

(4) - Carga na superfície externa à região com armadura de cisalhamento (C'');

O pesquisador concluiu que as lajes do grupo 01 apresentaram valores 8% acima das previsões normativas, enquanto as lajes do grupo 02 também apresentaram valores conservadores, exceto a laje I7 que apresentou um valor de 7% contra a segurança.

Tabela 9 - Comparação da carga experimental com os a estimativa ACI-318/02									
Laje	$F_n^{(1)}$ (kN)	$F_{n,adj}^{(2)}$ (kN)	$F_{n,int}^{(3)}$ (kN)	$F_{n,ext}^{(4)}$ (kN)	V_{cal} (kN)	V_{teste} (kN)	$\frac{V_{teste}}{V_{calculado}}$	Modulo de Ruptura	
								Previsto	Real
E1	452	677	1275	1596	667	1100	1,62	Interno	Externo
E2	460	691	1279	1628	691	990	1,43	Adjacente	Interno
E3	488	732	1293	1725	732	1090	1,49	Interno	Externo
E4	463	695	1248	1655	695	1205	1,73	Interno	Externo
E5	472	707	1252	1686	707	1222	1,73	Interno	Externo
I6	476	714	516	1666	516	830	1,61	Interno	Interno
I7	479	718	939	1677	718	978	1,36	Adjacente	Interno
I8	453	679	674	1585	674	856	1,27	Interno	Interno
I9	512	768	389	1274	389	853	2,19	Interno	Interno
I10	516	775	598	1286	598	975	1,63	Interno	Interno
I11	499	748	460	1241	460	945	2,05	Interno	Interno

(1) - Carga para laje sem armadura de cisalhamento;

(2) - Carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar;

(3) – Carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento;

(4) - Carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento.

O ACI apresenta valores muito conservadores, sendo as variações de carga de ruptura em relação as cargas experimentais entre 43% e 73% nas lajes do grupo 01 e de 36% a 119% nas lajes do grupo 02.

Tabela 10 - Comparação da carga experimental com os a estimativa pelo CEB/MC 90									
Laje	$F_{sd}^{(1)}$ (kN)	$F_{sd}^{(2)}$ (kN)	$F_{sd}^{(3)}$ (kN)	$F_{sd}^{(4)}$ (kN)	V_{cal} (kN)	V_{teste} (kN)	$\frac{V_{teste}}{V_{calculo}}$	Modulo de Ruptura	
								Previsto	Real
E1	401	1154	1425	918	918	1100	1,20	Externo	Externo
E2	406	1192	1429	930	930	990	1,06	Externo	Interno
E3	422	1311	1441	967	967	1090	1,13	Externo	Externo
E4	401	1257	1390	931	931	1205	1,29	Externo	Externo
E5	406	1294	1393	943	943	1222	1,30	Externo	Externo
I6	415	1259	609	913	906	830	1,36	Interno	Interno
I7	417	1272	1062	917	917	978	1,07	Externo	Interno
I8	402	1160	781	884	781	856	1,10	Interno	Interno
I9	438	1391	471	753	471	853	1,81	Interno	Interno
I10	441	1411	695	758	695	975	1,40	Interno	Interno
I11	431	1335	549	741	549	945	1,72	Interno	Interno

(1) - Carga para laje sem armadura de cisalhamento;

(2) - Carga para laje com armadura de cisalhamento, superficie de ruptura adjacente ao pilar;

(3) – Carga para laje com armadura de cisalhamento, superficie de ruptura cruzando a região com armadura de cisalhamento;

(4) - Carga para laje com armadura de cisalhamento, superficie de ruptura externa a região com armadura de cisalhamento.

As cargas estimadas pelo CEB/MC90 também apresentam valores conservadores, cerca de 6% a 30% para lajes do grupo 01 e as cargas do grupo 02 cerca de 41% acima das cargas experimentais.

Tabela 11 - Comparação da carga experimental com os a estimativa pelo EC2/2002									
Laje	$F_{sd}^{(1)}$ (kN)	$F_{sd}^{(2)}$ (kN)	$F_{sd}^{(3)}$ (kN)	$F_{sd}^{(4)}$ (kN)	V_{cal} (kN)	V_{teste} (kN)	$\frac{V_{teste}}{V_{calculado}}$	Modulo de Ruptura	
								Previsto	Real
E1	567	1154	1511	1229	1154	1100	0,95	Adjacente	Externo
E2	574	1192	1516	1245	1192	990	0,83	Adjacente	Interno
E3	597	1311	1533	1294	1294	1090	0,84	Externo	Externo
E4	563	1257	1469	1238	1238	1005	0,97	Externo	Externo
E5	570	1294	1474	1253	1253	1222	0,97	Externo	Externo
I6	587	1259	728	1259	728	830	1,14	Interno	Interno
I7	590	1272	1166	1264	1166	978	0,84	Interno	Interno
I8	568	1160	889	1218	889	856	0,96	Interno	Interno
I9	622	1391	604	1009	604	853	1,41	Interno	Interno
I10	626	1411	822	1015	822	975	1,19	Interno	Interno
I11	611	1335	677	992	677	945	1,40	Interno	Interno

(1) - Carga para laje sem armadura de cisalhamento;

(2) - Carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar;

(3) - Carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura cruzando a região com armadura de cisalhamento;

(4) - Carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura externa a região com armadura de cisalhamento.

Para o EC2/2002 os valores estimados foram em média 8% acima dos valores experimentais para as lajes do grupo 01 e para as lajes do grupo 02 as lajes I7 e I8 tiveram valores contra a segurança.

Com a análise dos dados o pesquisador chegou as seguintes conclusões:

Os acréscimos de resistência das lajes pesquisadas são significativos se comparadas com lajes sem armadura de punção, comprovando a eficiência do uso de armadura de punção, interna a armadura de flexão (sem ancorar).

A armadura de punção com a utilização de ganchos não diminuiu a resistência das lajes a punção se comparados com as armaduras devidamente ancoradas (comparação das lajes G10 e G11 com as lajes I9, I10 e I11)

A utilização de ganchos em U na parte inferior da armadura de punção retardou o surgimento de fissuras, e provocou um pequeno aumento na resistência ao cisalhamento das lajes.

Para as lajes do grupo 01 os resultados mais conservadores estão relacionados ao ACI 318/02, sendo a ABNT NBR 6118/2003 foi a que apresentou as melhores estimativas, seguidas do EUROCODE 2/2002.

Para as lajes do grupo 02, com superfície de ruptura cruzando a armadura de punção, o EUROCODE 2/002 estimou os resultados mais próximos dos ensaios.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A simulação de lajes reais de uma edificação em um laboratório é uma tarefa árdua que demanda uma grande logística, espaço físico e recursos financeiros e tecnológicos avançados. Visando executar os experimentos sem grandes problemas, pesquisadores adotam modelos experimentais simplificados que simulam o comportamento das estruturas quando submetidas a carregamentos variados.

Os modelos de lajes da pesquisa representam regiões de momentos negativos em torno do pilar considerando simetria nos carregamentos e geometria dos pavimentos. Em edifícios essas regiões são limitadas por regiões de momentos nulos à uma distância aproximada de 22% do vão entre pilares. Considerando que as lajes têm dimensões de 2,5 m x 2,5 m elas representam vão de pavimentos de aproximadamente 5,7 metros. Na Figura 35 está representado de forma esquemática o modelo estudado na pesquisa.

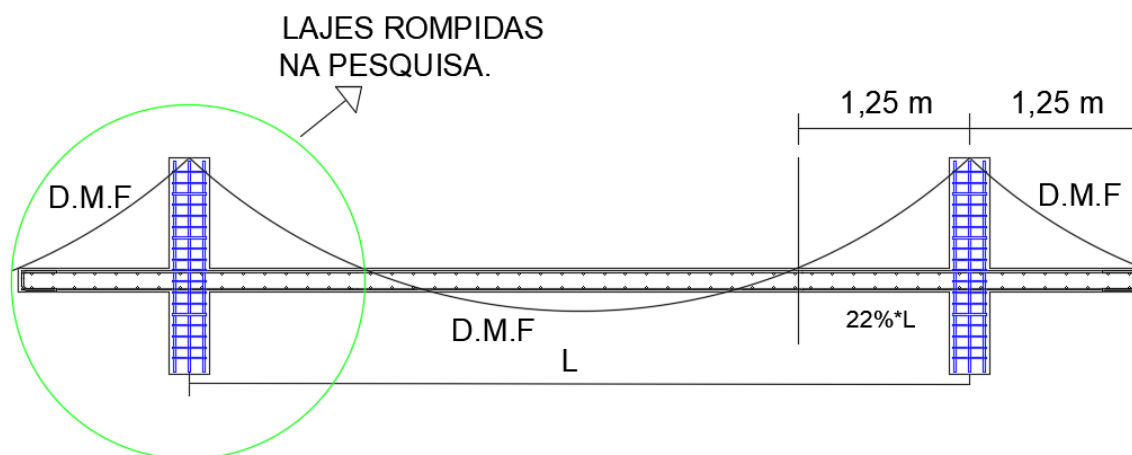
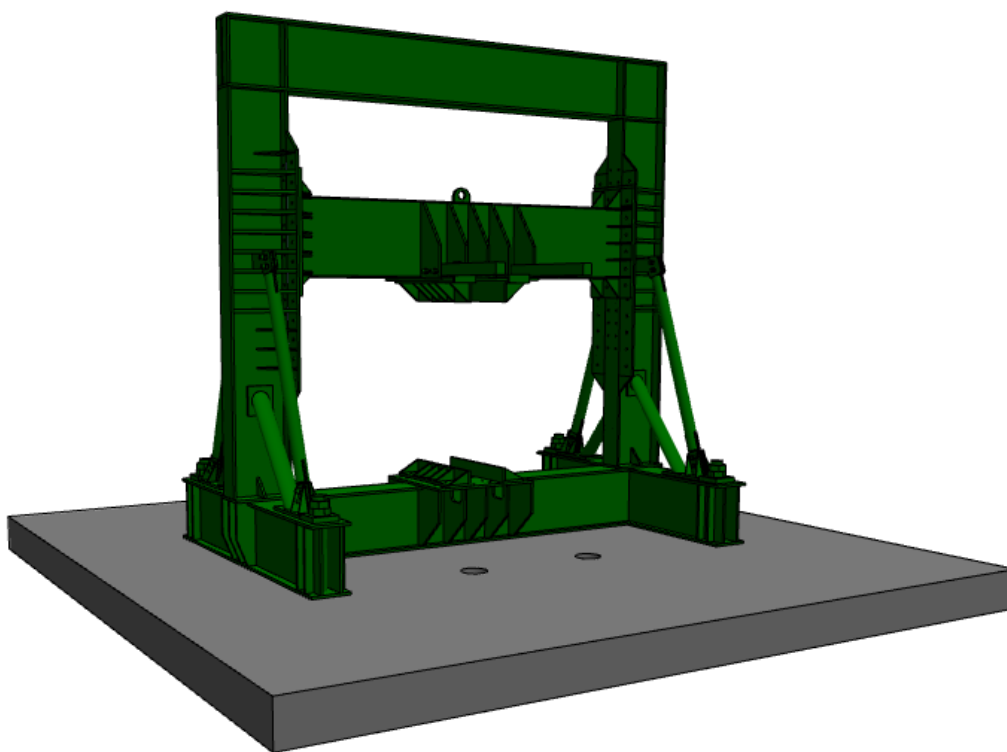


Figura 35 - Representação de modelos de lajes ensaiadas

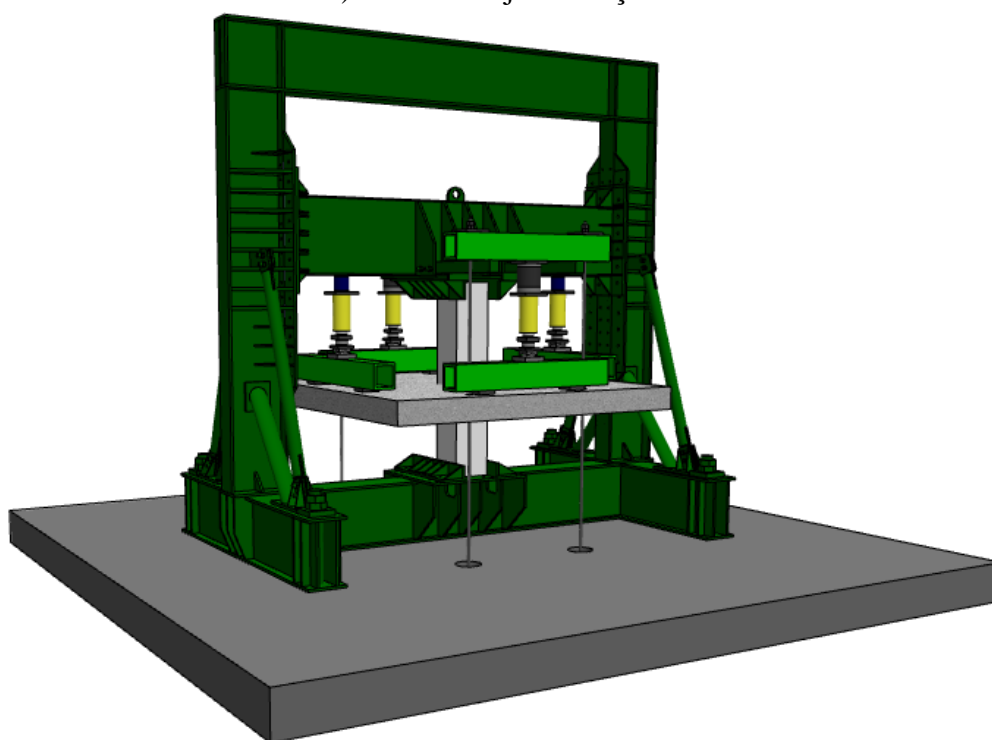
3.1 SISTEMA DE ENSAIOS

No experimento, as lajes foram rompidas por atuação de macacos hidráulicos que apoiados em um sistema de ações e reações, aplicam cargas em vigas metálicas e estas apoiadas sobre placas que descarregam as cargas sobre a laje. Com a atuação dos macacos hidráulicos o sistema é tracionado através de 4 tirantes que são ancorados na laje de reação. Para a realização do ensaio é necessário uma equipe técnica formada por 2 operadores que irão realizar a aplicação de carga e 1 componente que realizara a marcação das fissuras ao decorrer do experimento.

Na Figura 36 a seguir está representado o mecanismo utilizado no ensaio para rompimento das lajes.

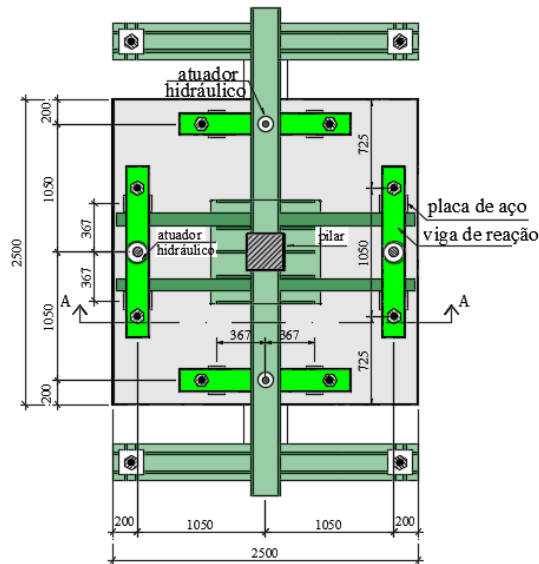


a) Pórtico e laje de reação

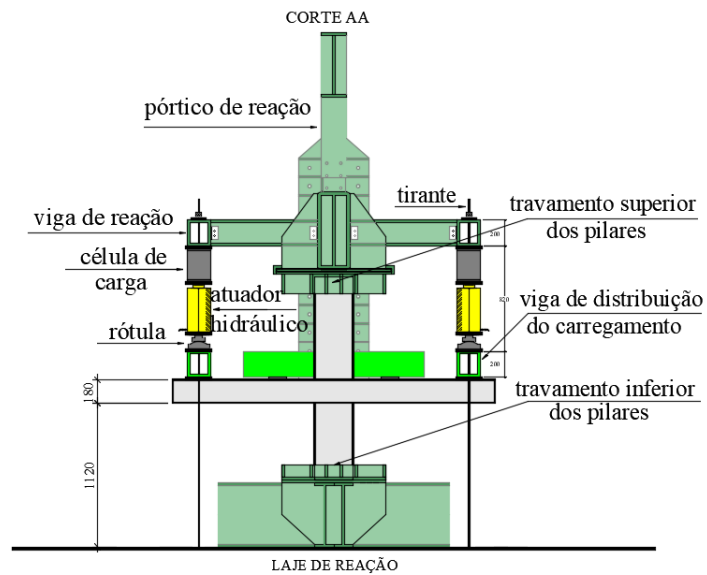


a) laje pronta para ser ensaiada

Figura 36 - continua



c) Vista Superior do sistema de ensaio



d) Vista lateral do sistema de ensaio



e)

Figura 36 - a) Pórtico e laje de reação (Santos - Adaptado); b) Sistema pronto para ensaio; c) Vista superior do sistema de ensaio; d) Vista lateral do sistema de ensaio; e) Perspectiva da laje FS-3 pronta para ser ensaiada.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS

Nesta pesquisa 4 painéis de lajes lisas foram ensaiados à punção simulando a ligação laje-pilar, submetidos a carregamento simétrico e pilar de centro. A primeira laje usada como referência foi armada somente com armadura de flexão, as demais foram armadas com armaduras de flexão e punção, variando a ancoragem da armadura de punção. A Tabela 12 traz resumidamente as características gerais das lajes estudadas nesta pesquisa.

Tabela 12 - Características das lajes ensaiadas na pesquisa

Modelos	d (cm)	ρ_{flex} (%)	f_{cj} (MPa)	CARACTERÍSTICAS DAS LAJES
RSP	14,79	0,92		Laje maciça de referência, sem armadura de punção.
FS - 01	14,71	0,92		Armadura de punção com estribos fechado de 8 mm, ancorada na armadura tracionada e comprimida
FS - 02	14,81	0,91	29,9	Armadura de punção com estribo fechado de 8 mm, ancorada somente na armadura de flexão comprimida
FS - 03	14,80	0,91		Armadura de punção com estribo fechado com 8 mm, sem ancoragem na armadura de flexão tracionada e comprimida

· Dimensão das lajes: 2500 x 2500 / 180 (mm);
 · Os pilares têm 300 x 300 x 600 mm (inferior) e 300 x 300 x 800 mm (superior);
 · Todos os estribos são de duas pernas com $S_0 = 80$ mm e $S_r = 80$ mm.

Na Figura 37 a seguir estão representados as características gerais das lajes ensaiadas.

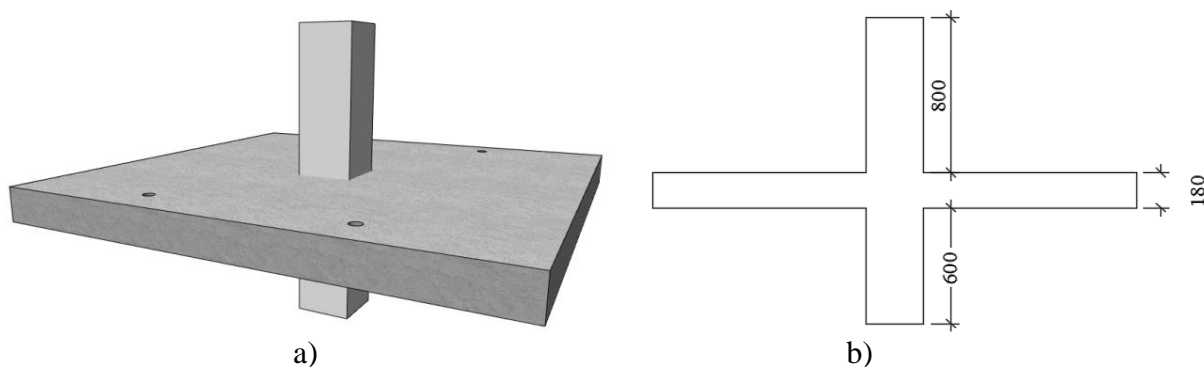


Figura 37 – a) Perspectiva das lajes dos ensaios; b) Características gerais das lajes dos ensaios (medidas em milímetros)

Na Figura 38 segue a representação gráfica da laje RSP de referência

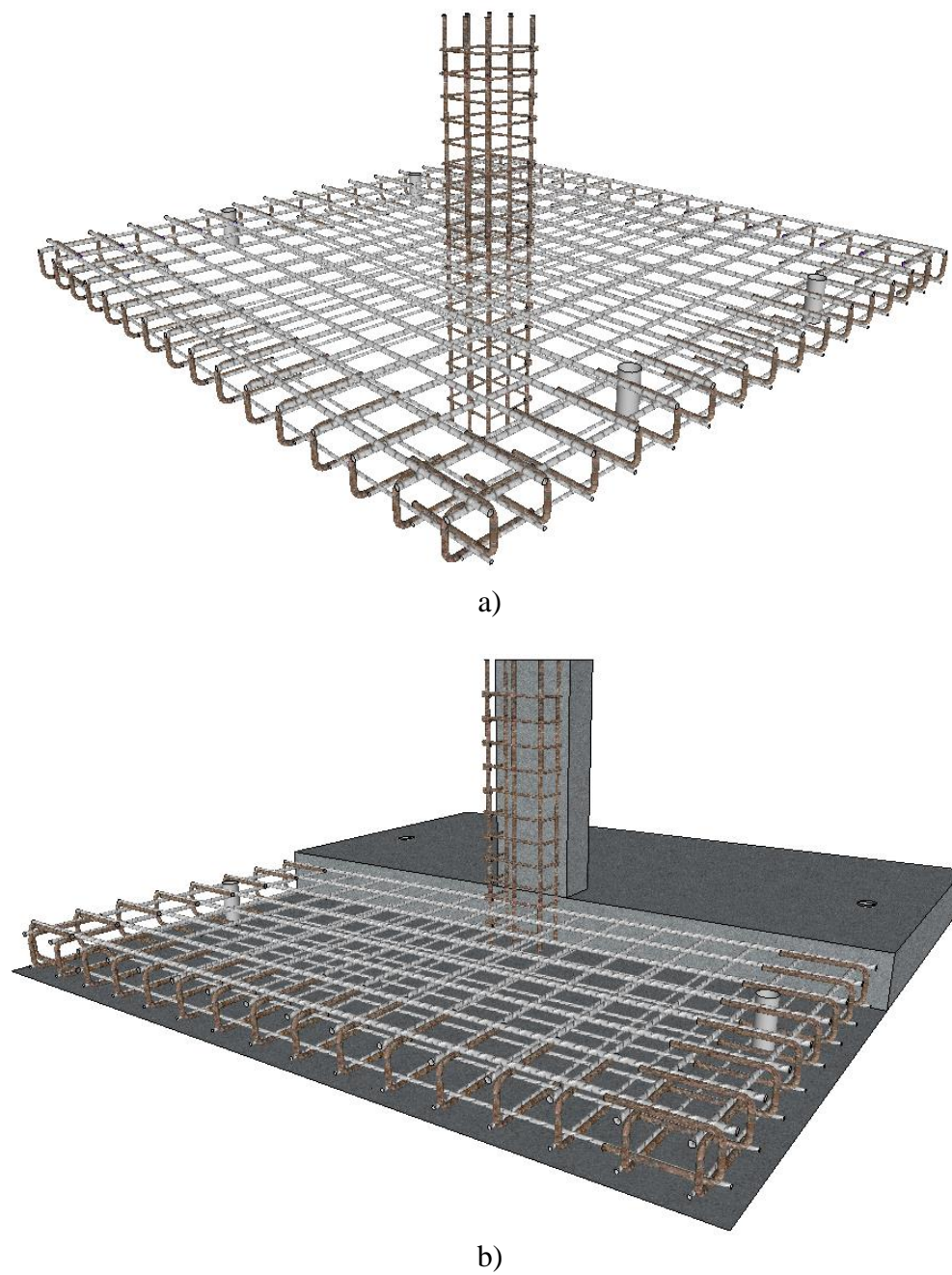
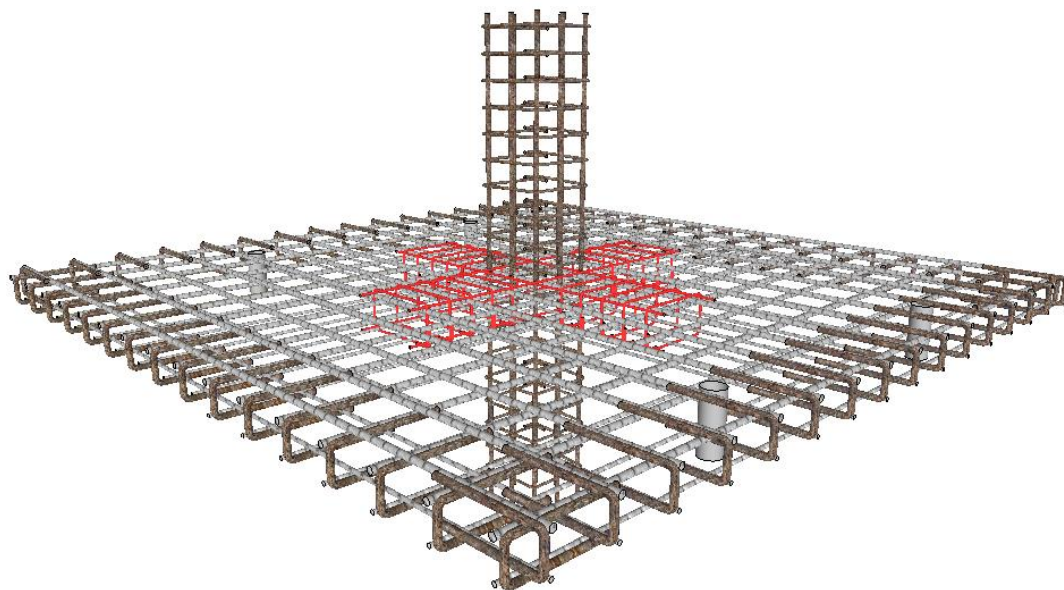
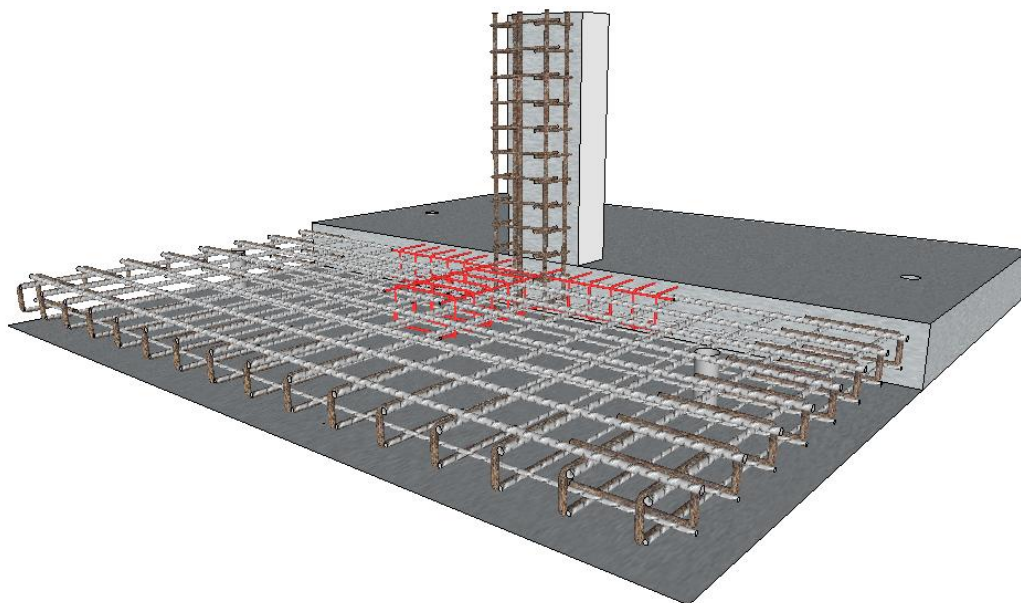


Figura 38 – a) Representação das armaduras da laje RPS de referência; b) Representação da laje RSP corte em perspectiva.

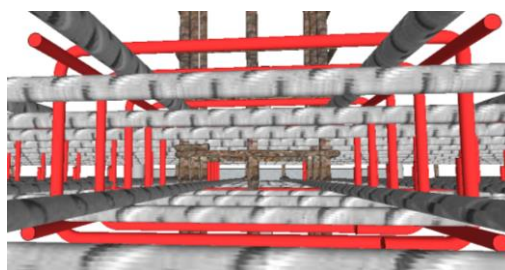
Na Figura 39 segue a representação gráfica da laje FS-1



a)



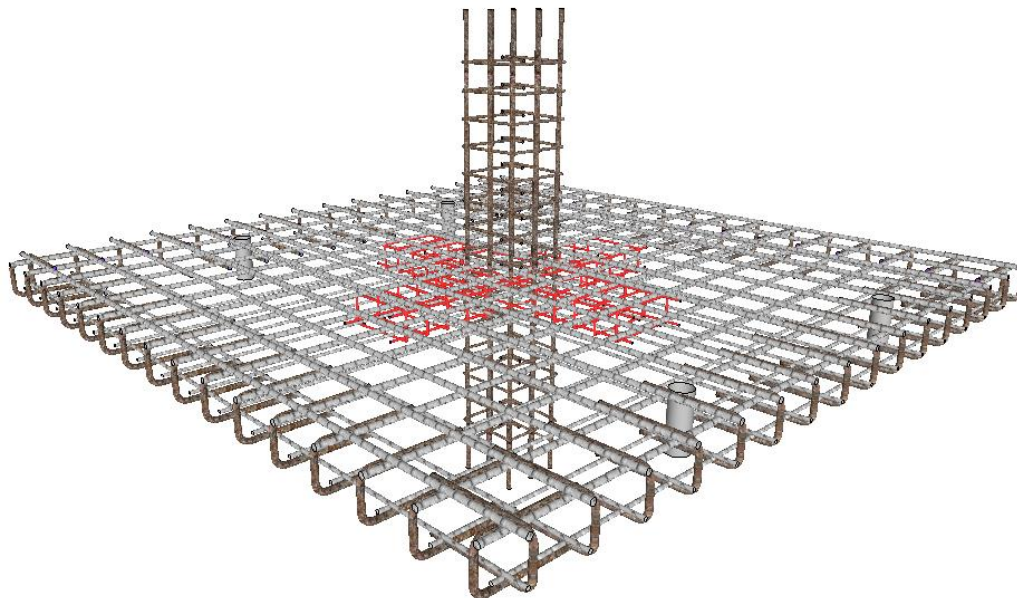
b)



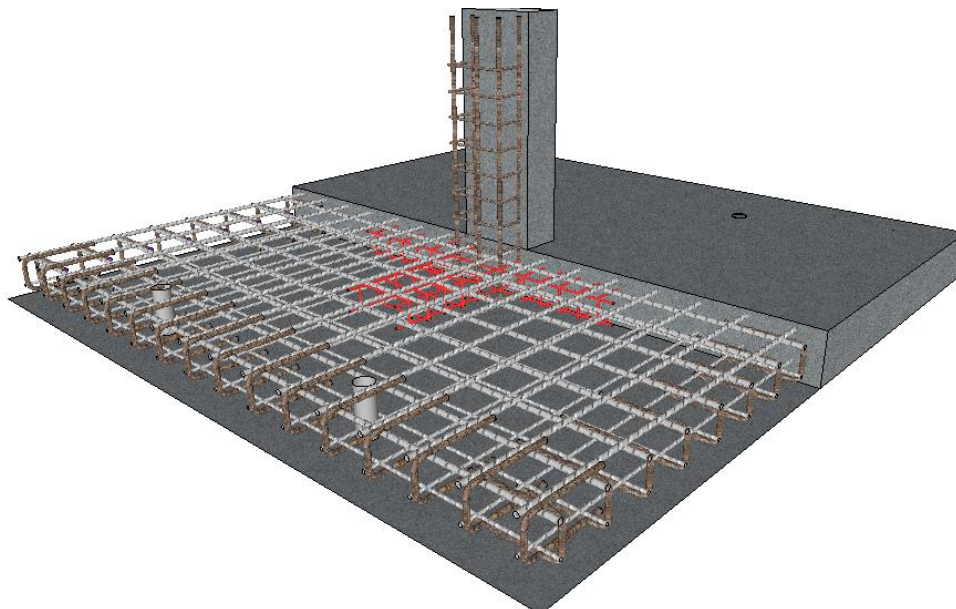
c)

Figura 39 - a) Representação gráfica das armaduras da laje FS-1; b) Representação da laje FS-1 corte em perspectiva; c) Representação gráfica do entrelaçamento da armadura de flexão e punção na laje FS-1.

Na Figura 40 segue a representação gráfica da laje FS-2



a)



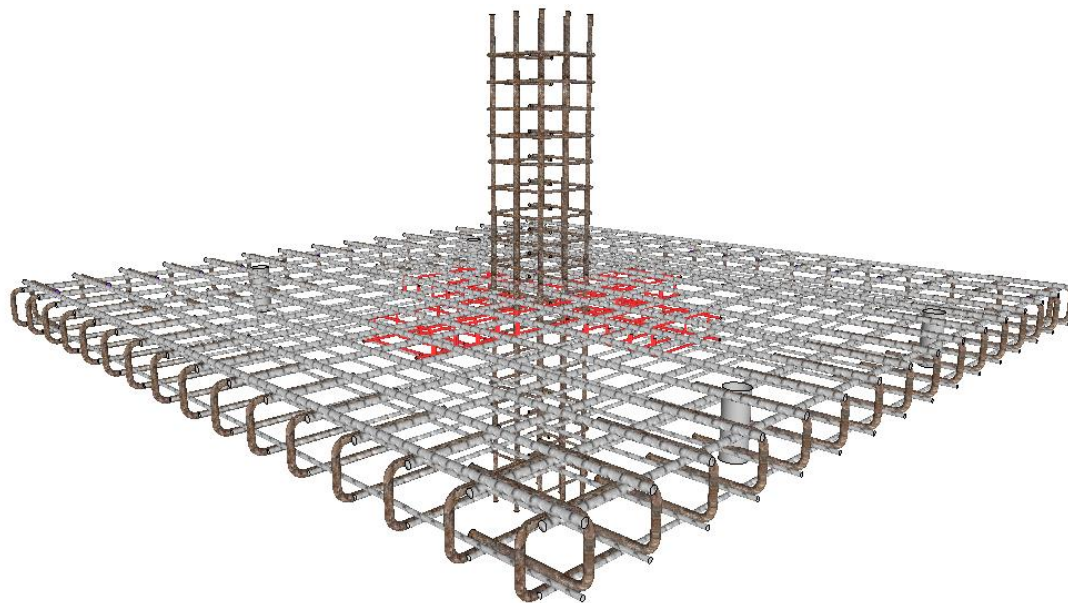
b)



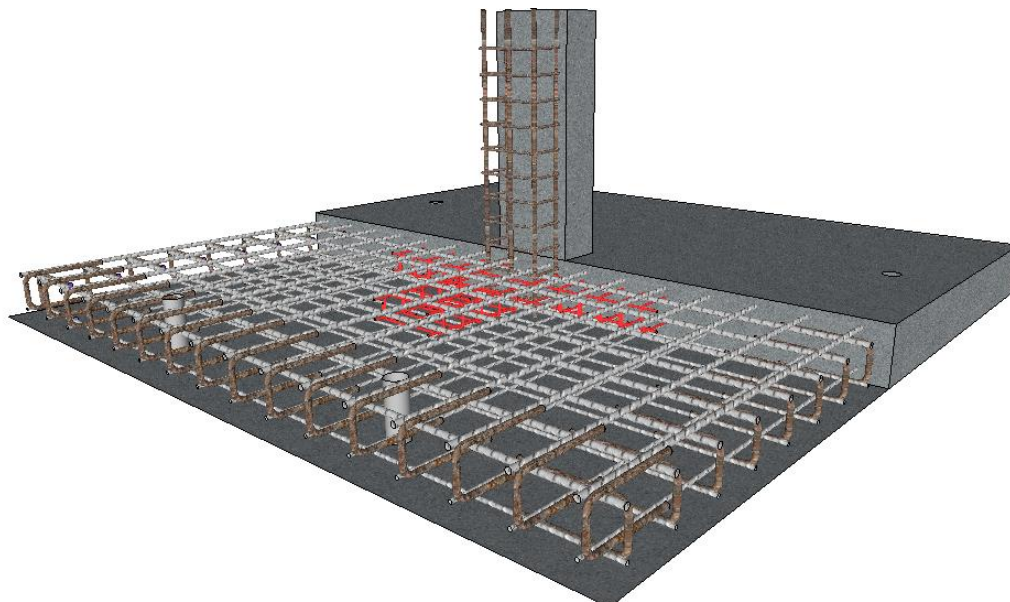
c)

Figura 40 - a) Representação gráfica das armaduras da laje FS-2; b) Representação da laje FS-2 corte em perspectiva; c) Representação gráfica do entrelaçamento da armadura de flexão e punção na laje FS-2.

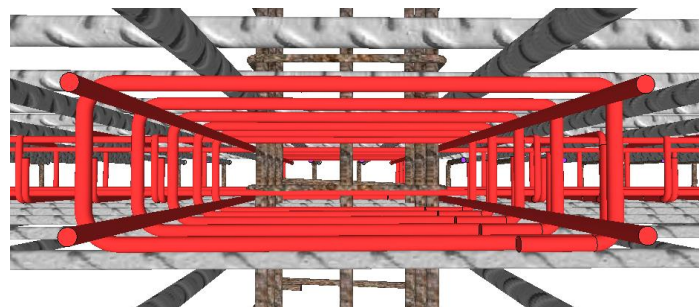
Na Figura 41 segue a representação gráfica da laje FS-3



a)



b)



c)

Figura 41 - a) Representação gráfica das armaduras da laje FS-3; b) Representação da laje FS-3 corte em perspectiva; c) Representação gráfica do entrelaçamento da armadura de flexão e punção na laje FS-3.

3.3 DETALHAMENTO DAS ARMADURAS

3.3.1 ARMADURAS DE FLEXÃO

A armação de flexão das lajes foi composta por barras de aço CA50, composta por uma malha de armaduras de flexão tracionada nas duas direções e uma malha de armaduras de flexão comprimida também nas duas direções. A malha tracionada foi composta por 16 barras de aço com diâmetro de 16 milímetros em ambas as direções, sendo espaçadas de 155 mm. A malha comprimida foi composta por 16 barras de aço com diâmetro de 10 milímetros em ambas as direções, sendo as barras espaçadas de 155 milímetros. Ambas as malhas foram ancoradas no bordo da laje com ancoragem do tipo gancho. Foi respeitado o cobrimento nominal de 2 centímetros de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014). As Figuras 42 a 45 mostram o detalhamento da armadura de flexão.

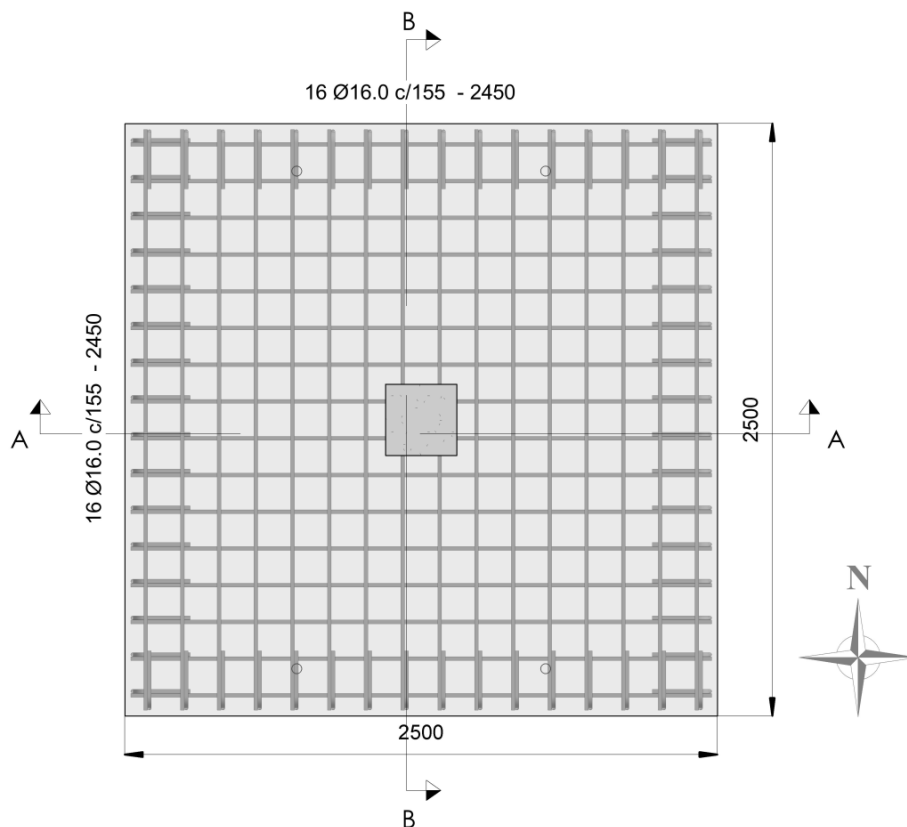


Figura 42 - Detalhamento das armaduras de flexão tracionada (medidas em milímetros)

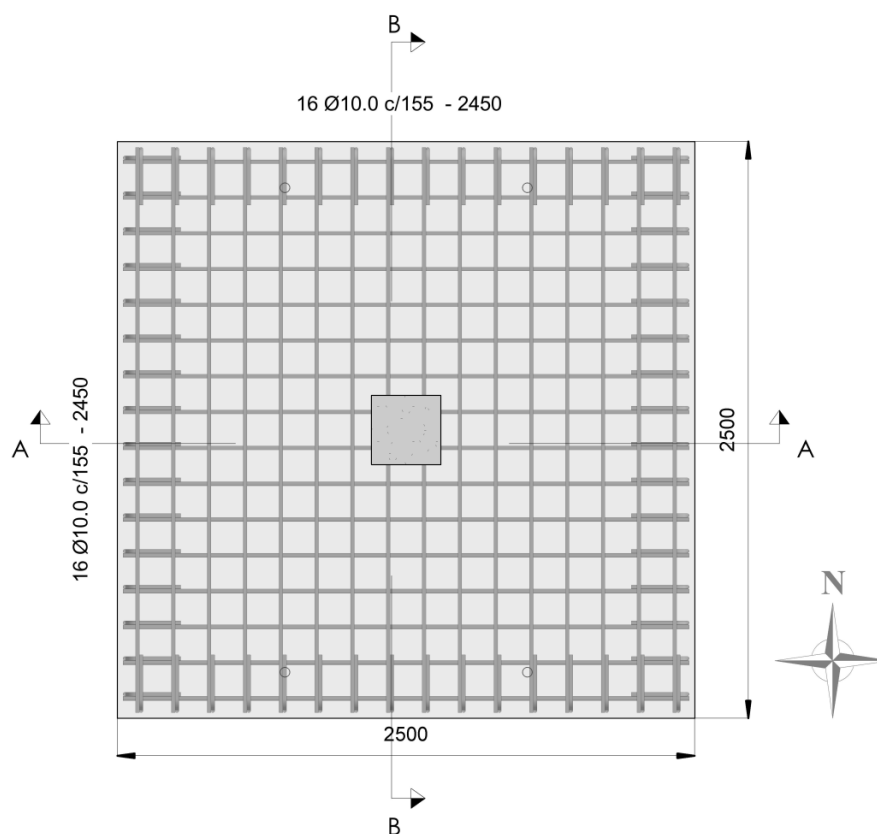


Figura 43 – Detalhamento da armadura de flexão comprimida (medidas em milímetros)

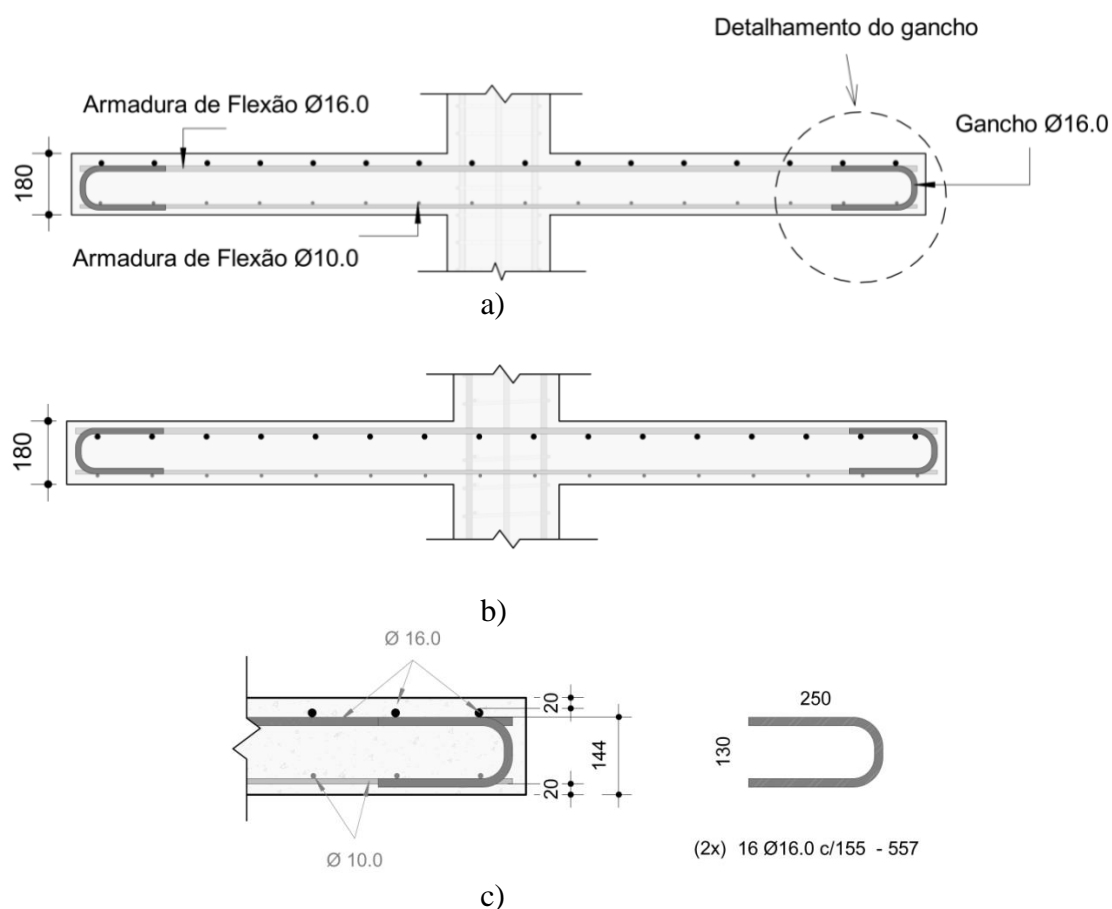


Figura 44 – a) Representação do corte AA da armadura de flexão; b) Representação do corte BB das armaduras de flexão; c) Representação do detalhamento dos ganchos da armadura de flexão.



Figura 45 - Perspectiva das armaduras de flexão.

3.3.2 ARMADURAS DE PUNÇÃO

A armadura de punção utilizado na pesquisa é do tipo estribo fechado e foi disposta na laje em duas direções de acordo com as prescrições normativas vigentes. O aço utilizado foi o CA50 sendo que no pedido já veio cortado e dobrado, portanto, no laboratório cabendo o trabalho de montagem.

Na primeira laje (RSP) utilizada como referência não foi utilizada armadura de punção. Nas próximas 3 lajes foram utilizadas armaduras de punção com diâmetro de 8 milímetros, sendo que na primeira laje (FS-1) a armadura de punção foi ancorada na armadura de flexão tracionada e comprimida tendo uma altura de 140 milímetros, na segunda laje (FS-2) a armadura de punção ancorada somente na armadura de flexão comprimida tendo uma altura de 116 milímetros e na terceira laje (FS-3) a armadura de punção ficou sem ancoragem, sendo a altura da armadura de 88 milímetros.

Nas lajes da pesquisa foram utilizadas 10 camadas de estribos na direção sul-norte e 10 camadas na direção oeste-leste, tendo um espaçamento de 80 milímetros. Na Figura 46 esta representada a disposição das armaduras de punção.

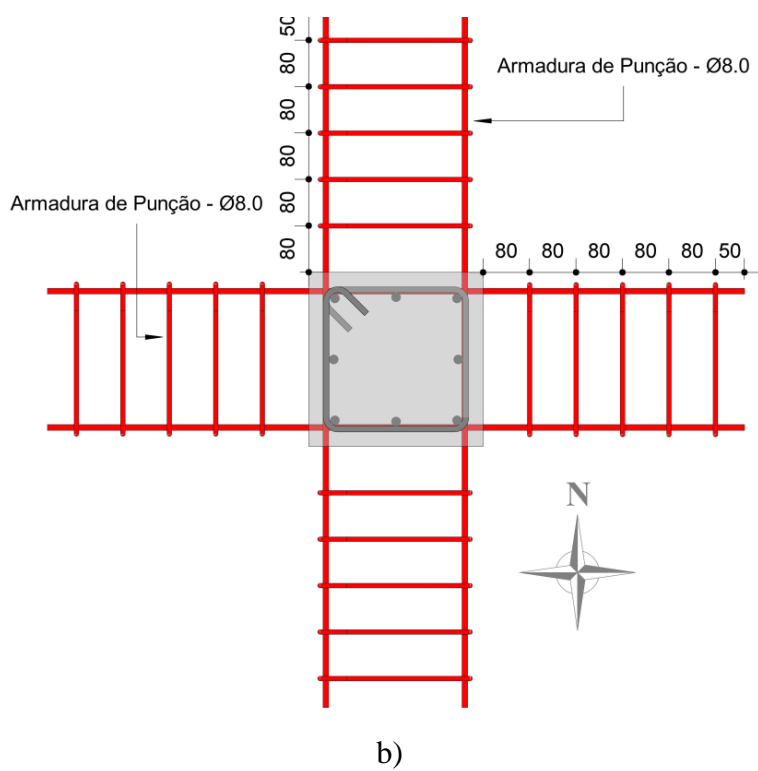
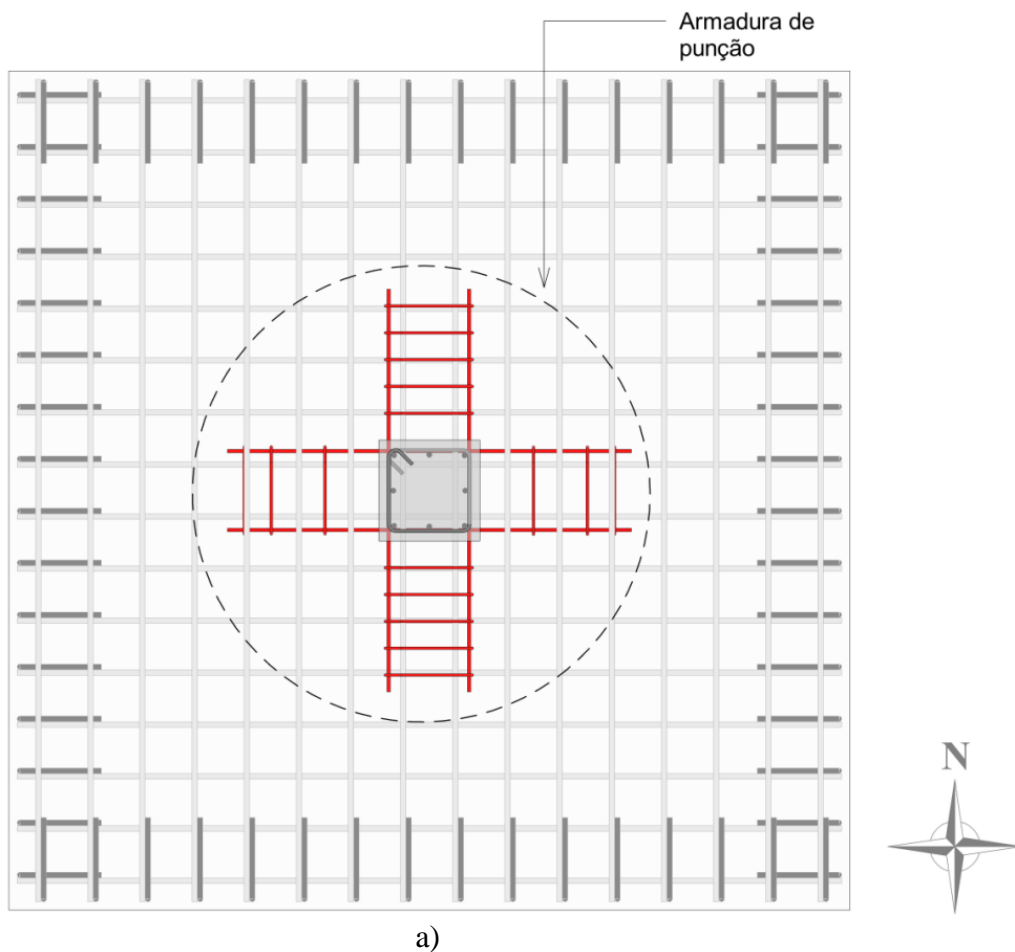


Figura 46 – a) Disposição das armaduras de punção tipo estribo fechado na laje; b) Detalhamento da armadura de punção.

3.3.2.1 Armadura de punção da laje FS-1

Na laje FS-1 a armadura de punção é ancorada nas armaduras de flexão tracionada e comprimida, entretanto esse tipo de ancoragem dificulta de forma considerável a execução em obra, podendo não ser viável em algumas situações, mesmo sendo prescritas pelas principais normas.

Na Figura 47 seguintes têm o detalhamento da laje FS-1.

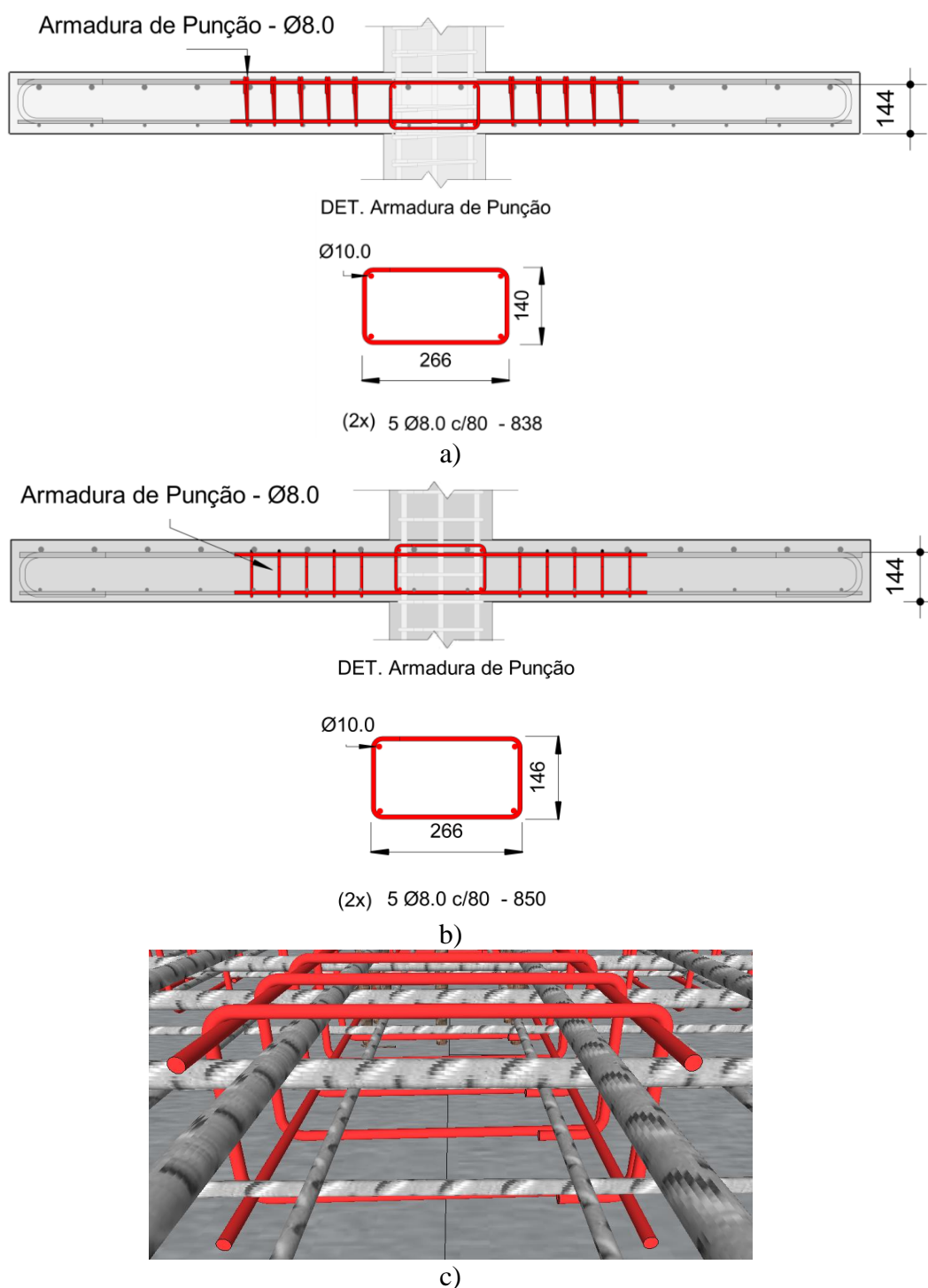


Figura 47 – Continua



d)

Figura 47 – Disposição das armaduras na laje FS-1, a) Detalhamento da armadura de punção no corte AA; b) Detalhamento da armadura de punção no corte BB; c) Perspectiva da armadura de punção; d) Disposição da armadura na laje FS-1.

3.3.2.2 Armadura de punção da laje FS-2

Na laje FS-2 a armadura de punção é ancorada na armadura de flexão comprimida, sendo a armadura de flexão tracionada somente apoiada na armadura de punção. Esta forma de sistema construtivo facilita a execução da laje uma vez que a armadura de punção servirá como espaçador tipo caranguejo para a armadura tracionada da laje. Na Figura 48 temos o detalhamento da armadura de punção da laje FS-2.

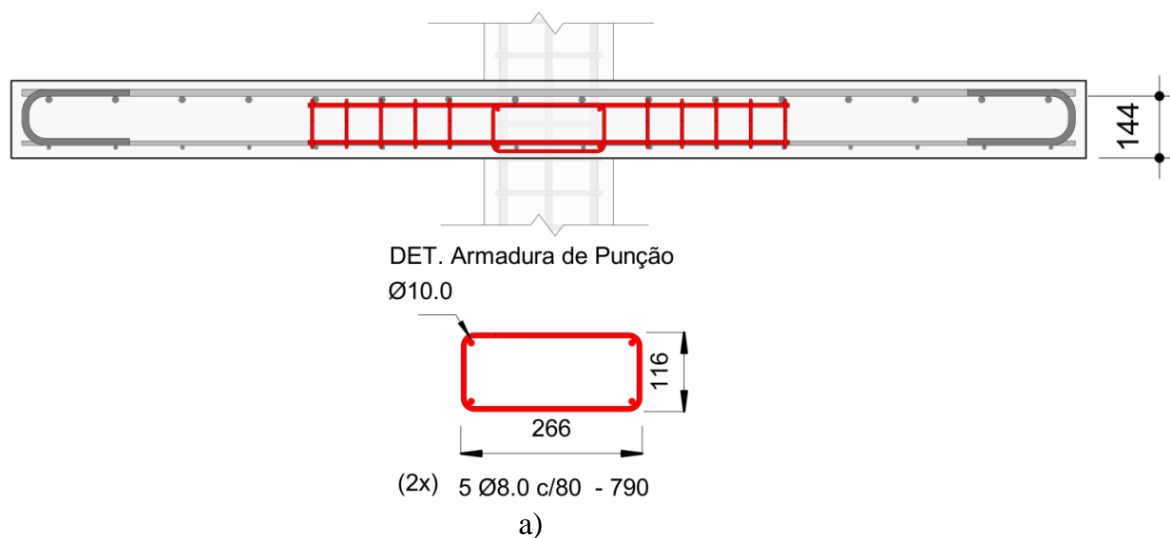


Figura 48 – Contínua

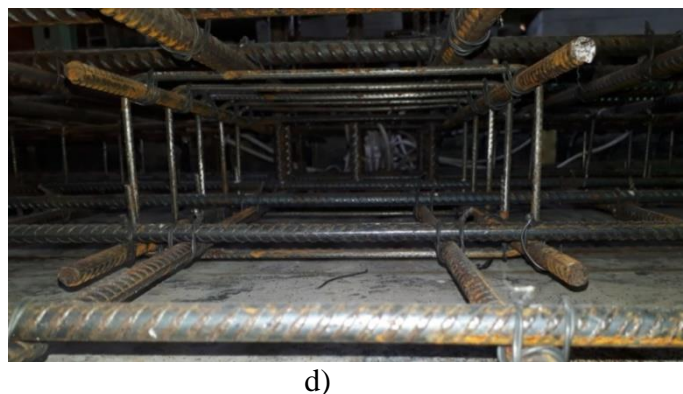
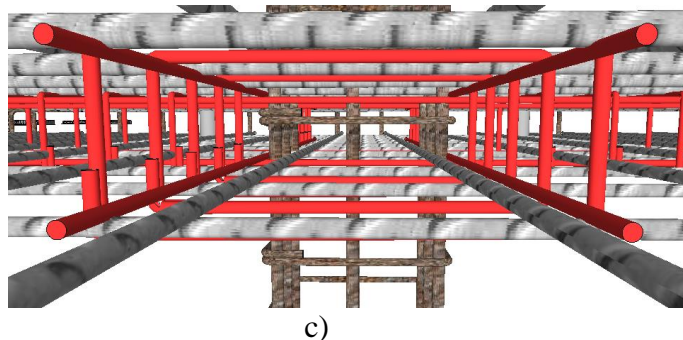
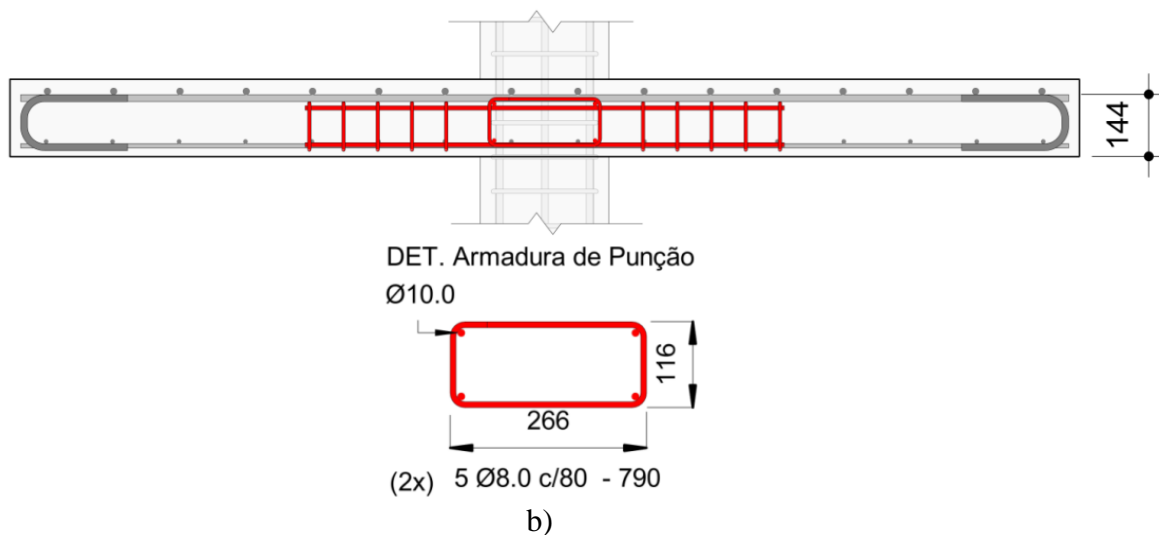
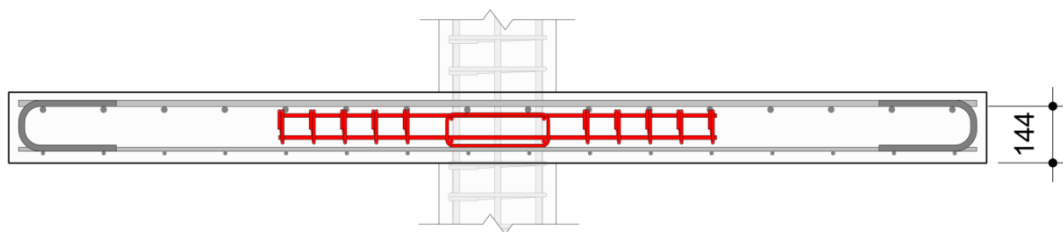


Figura 48 - a) Detalhamento da armadura de punção no corte AA; b) Detalhamento da armadura de punção no corte BB; c) Perspectiva da armadura de punção; d) Disposição da armadura na laje FS-2.

3.3.2.3 Armadura de punção da laje FS-3

Na Figura 44 a armadura de punção não é ancorada, servindo como espaçador tipo caranguejo para a armadura de flexão tracionada e comprimida. Este sistema construtivo é de muito fácil execução em obra, porém as normas vigentes estabelecem que todas as armaduras devam ser ancoradas.

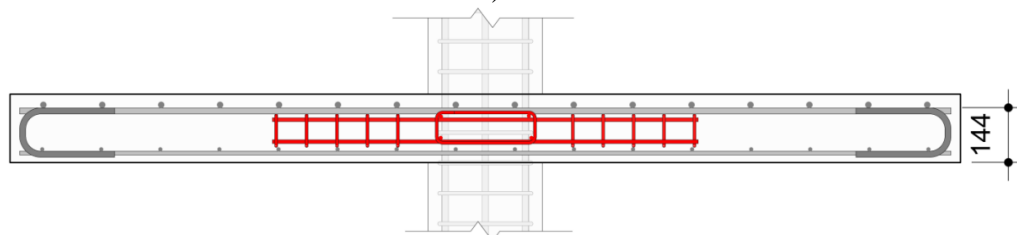


DET. Armadura de Punção
Ø10.0

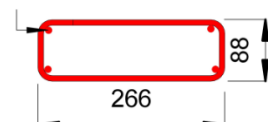


(2x) 5 Ø8.0 c/80 - 734

a)

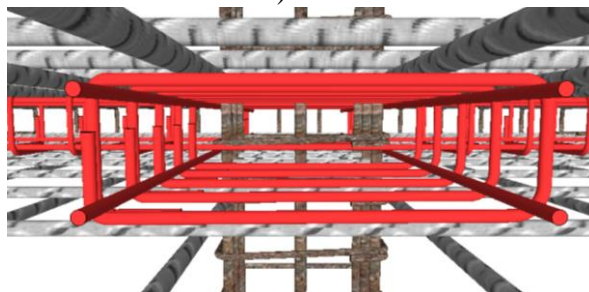


DET. Armadura de Punção
Ø10.0



(2x) 5 Ø8.0 c/80 - 734

b)



c)



d)

Figura 49 - a) Detalhamento da armadura de punção no corte AA; b) Detalhamento da armadura de punção no corte BB; c) Perspectiva da armadura de punção; d) Disposição da armadura na laje FS-2.

3.3.3 ARMADURA DOS PILARES

Os pilares utilizados na pesquisa possuem seção quadrada de 300 x 300 milímetros, sendo a parte inferior à laje composta por um comprimento de 600 milímetros e a parte superior à laje composta por uma altura de 800 milímetros.

A armadura longitudinal dos pilares foi composta por aço CA50 composta por 8 barras de 16 milímetros de diâmetro. Os estribos dos pilares são do tipo fechados, composto em todo o pilar por 18 barras de 10 milímetros de diâmetro, aço CA50 e espaçamento de 80 milímetros. Na Figura 50 temos o detalhamento e disposição das armaduras dos pilares (unidades em milímetros).

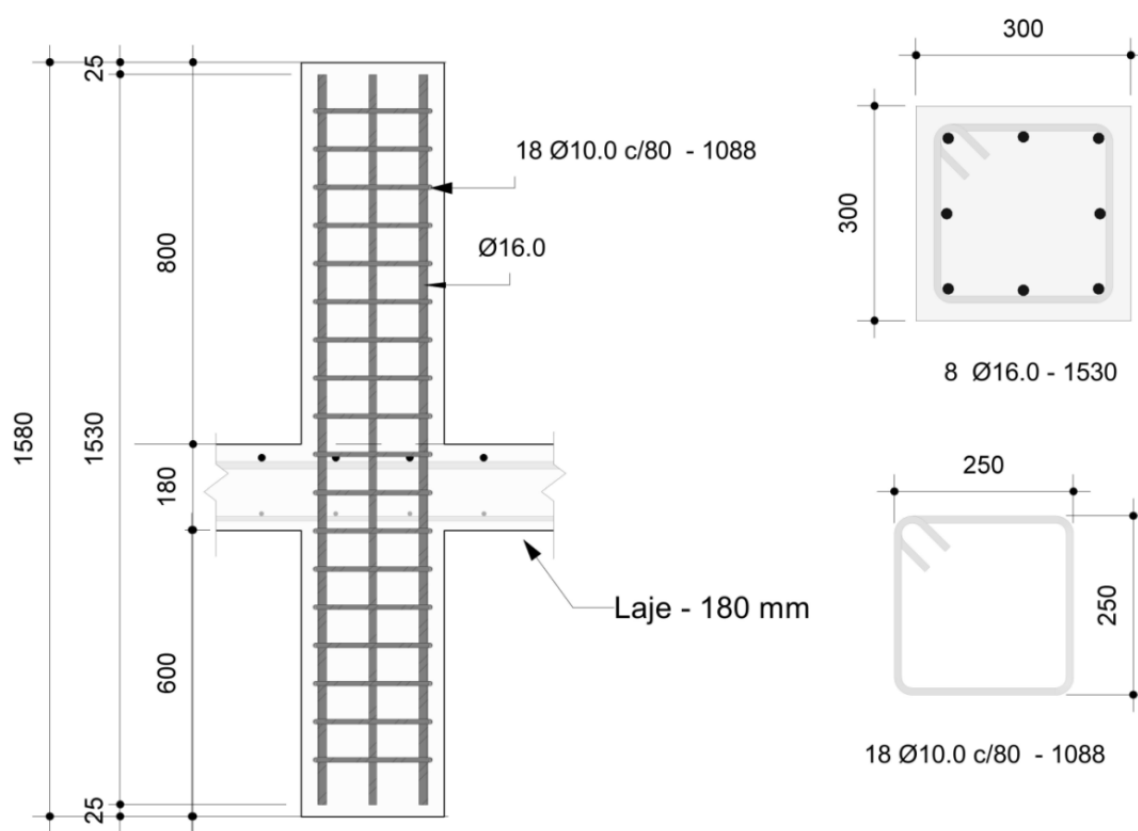


Figura 50 - Continua



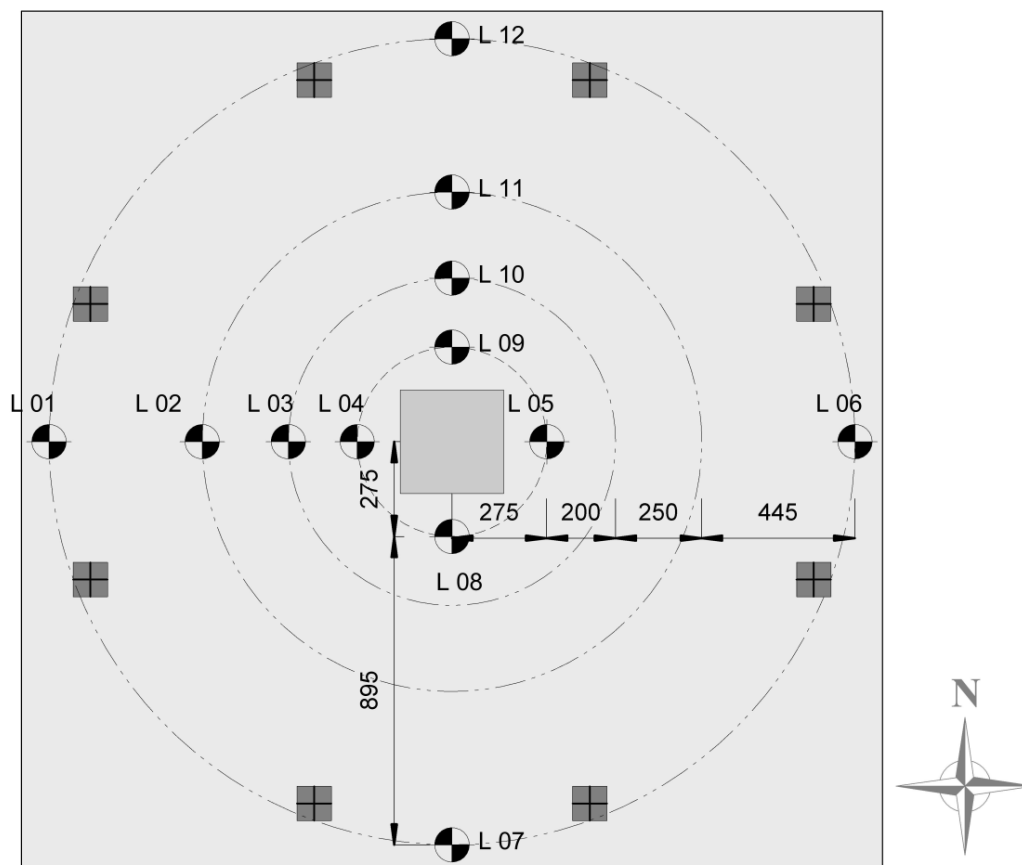
Figura 50 – a) Detalhamento das armaduras longitudinais e transversais dos pilares, mostrando a seção transversal e estribo; b) Disposição das armaduras nas lajes.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Foram escolhidos 12 pontos na laje para a medição dos deslocamentos verticais, sendo 6 pontos em uma direção e 6 pontos na outra direção. No sentido norte a partir do centro foram dispostos 4 pontos e no sentido sul 2 pontos, assim como no sentido leste foram dispostos 2 pontos e no sentido oeste 4 pontos.

Para marcação dos deslocamentos verticais foram utilizados LVDT's (transdutores de variação de deslocamentos linear), que são equipamentos medidores de deslocamentos. Esses LVDT's são calibrados no momento da instrumentação e sua leitura é feita automática a partir de um computador que monitora o experimento. Todos os LVDT's foram posicionados na parte superior da laje, em cima de placas de alumínio que garantem uma maior precisão na aquisição dos dados. A Figura 51 mostra a disposição dos LVDT's na laje.



a)



b)

Figura 51 – a) Disposição dos LVDT'S sobre a laje (unidades em milímetros); Foto dos LVDT's sobre a laje.

3.4.2 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE FLEXÃO E PUNÇÃO

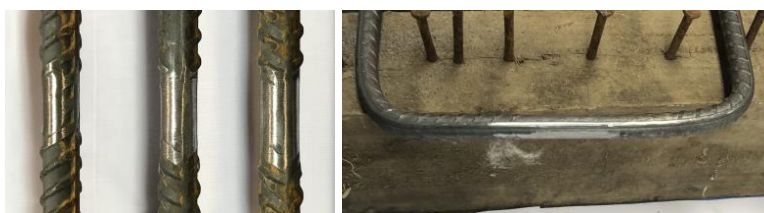
Para melhor entendimento do comportamento das lajes durante os experimentos acompanhou-se às deformações das armaduras de flexão e punção.

Para medição dessas deformações foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER) da marca *Kyowa Eletronic Instruments*, tipo KDFG-2-120-C1-11. Os extensômetros foram posicionados em pares diametralmente opostos em cada barra e tirado a média das deformações medidas. Para garantir que as medidas sejam feitas de forma correta as barras foram lixadas e posteriormente limpa com álcool, sendo a fixação dos extensômetros nas barras feita com adesivo instantâneo à base de cianoacrilato (cola SUPER BONDER).

Após a fixação dos extensômetros foram soldados os fios que levarão a leitura até o computador. Estes foram fixados às barras com auxílio de braçadeira plástica. Para proteção da região da solda foi colocada uma camada de adesivo à base de resina epóxi, posteriormente envolta com uma camada de silicone em gel para garantir proteção contra choques mecânicos e por fim envolvida com uma fita isolante. Na Figura 52 apresenta o passo a passo da instrumentação.



a) Material utilizado



b) Lixamento das armaduras de flexão e punção



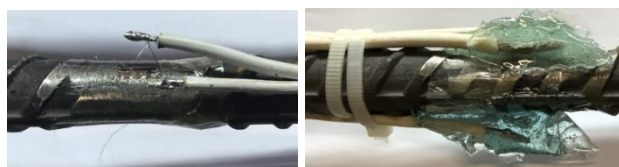
c) Limpeza das barras



d) Preparação dos extensômetros



e) Fixação dos extensômetros



f) Soldagem e proteção dos extensômetros.



g) Extensômetros prontos para o ensaio



h) Teste de resistência.

Figura 52 - Procedimento para instrumentação das barras de flexão e punção

3.4.2.1 Instrumentação das armaduras de flexão

Para a armadura de flexão foram instrumentadas 4 barras da armadura tracionada no sentido oeste-leste e 3 barras da armadura tracionada na direção norte-sul. A disposição da instrumentação da armadura de flexão está representada na Figura 53.

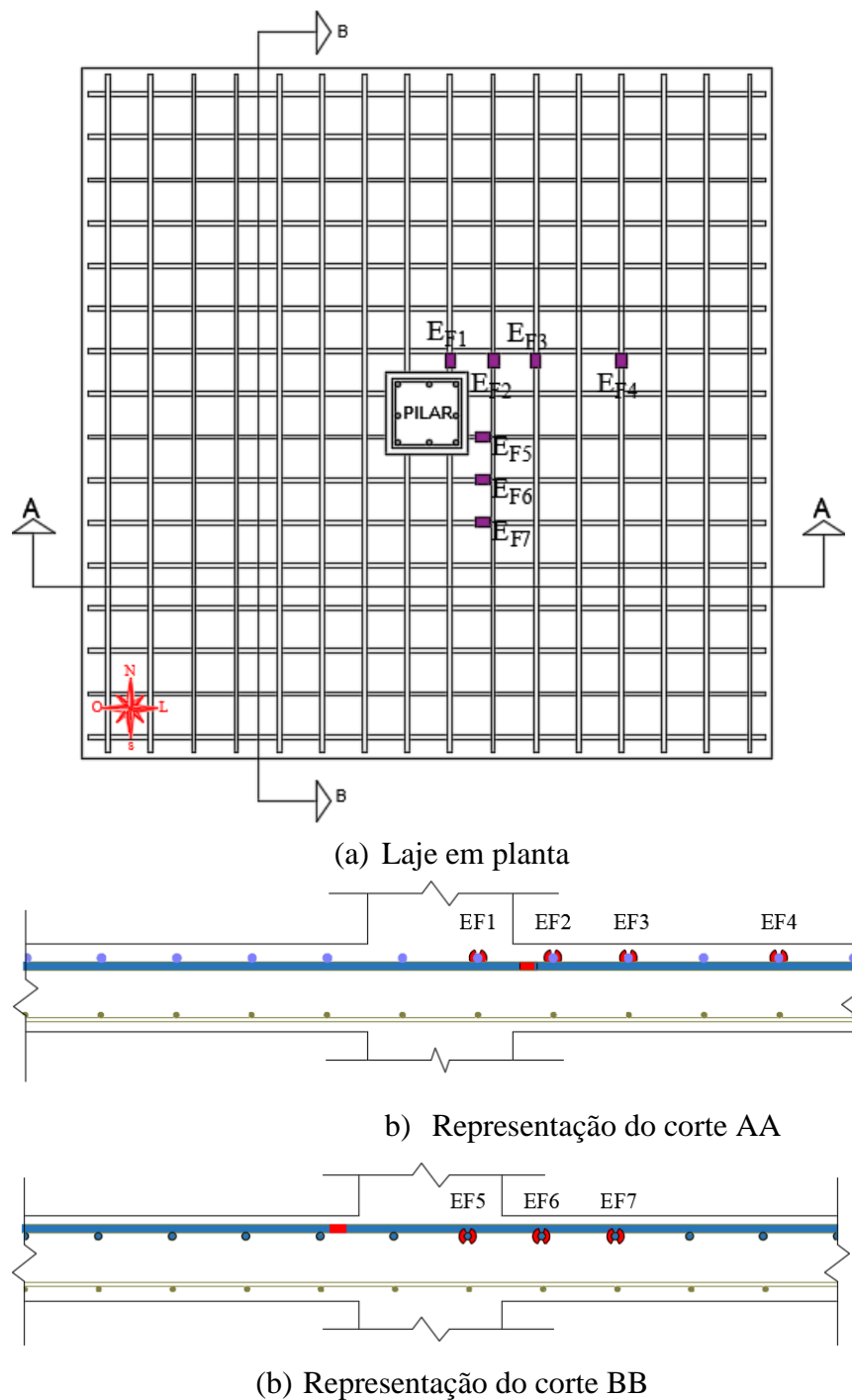


Figura 53 - Continua

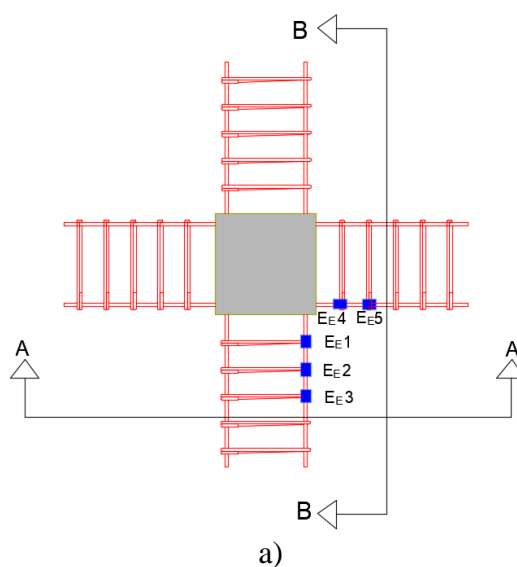


c)

Figura 53 - Posição dos extensômetros das armaduras de flexão tracionada, a) em planta; b) Corte AA e c) corte BB. Cortes ampliados para melhor entendimento do detalhamento; d) Imagem da posição dos extensômetros na armadura de flexão tracionada.

3.4.2.2 Instrumentação das armaduras de punção

A armadura de punção foi instrumentada com os mesmos extensômetros da armadura de flexão, sendo utilizados 3 extensômetros na direção leste-oeste e 2 na outra direção norte-sul. A Figura 54 apresenta a posição dos extensômetros na armadura de punção.



a)

Figura 54 - Continua

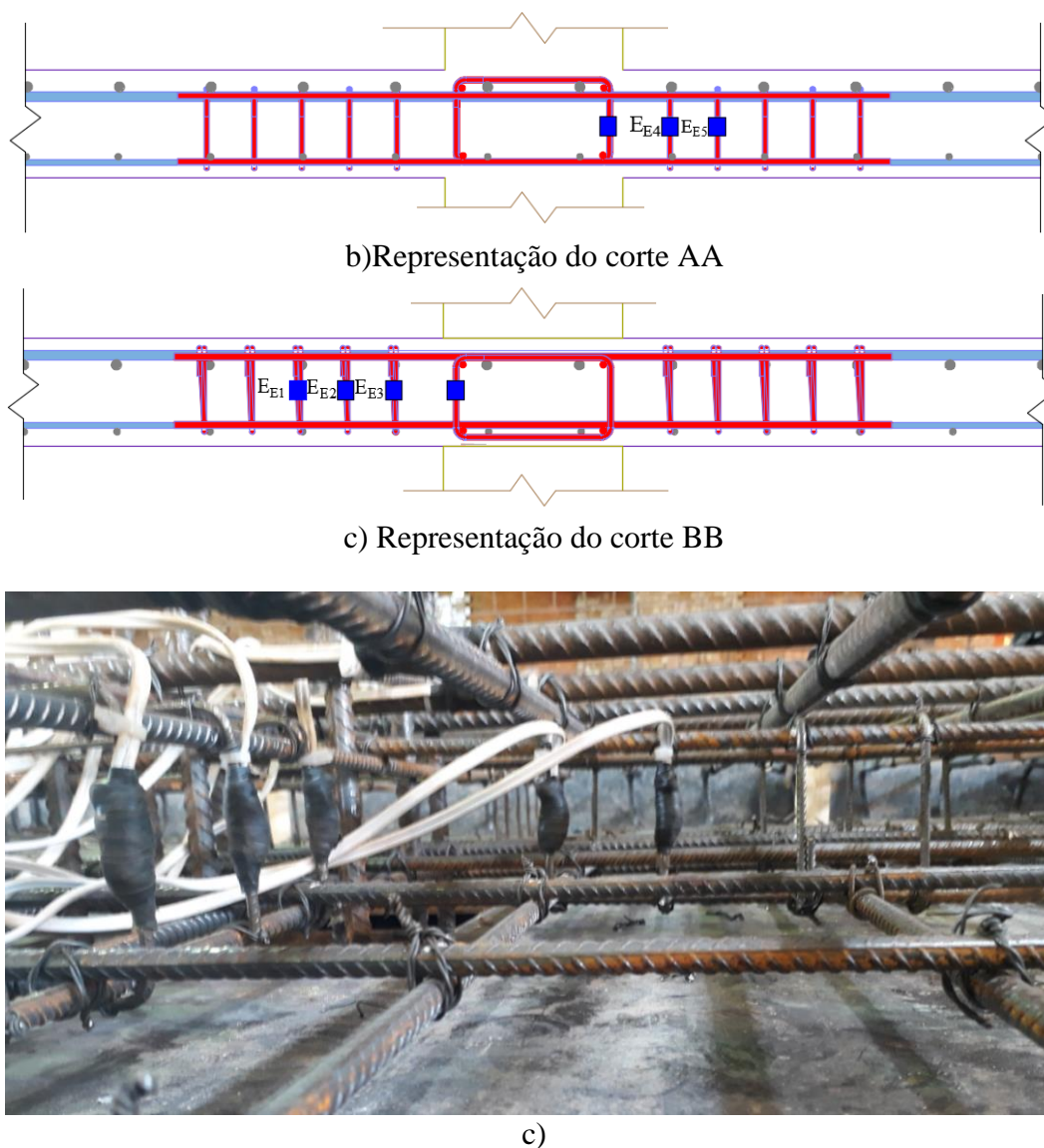


Figura 54 - a) Posição dos extensômetros na armadura de punção; b, c) Vista dos extensômetros em corte; d) Imagem do posicionamento dos extensômetros.

3.4.3 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

Os extensômetros utilizados para medição da deformação do concreto foi da marca *Kyowa Eletronic Instruments*, modelo KC-70-120-A1-11, sendo utilizados quatro extensômetros para cada laje, dois para medir as deformações radiais e dois para medir as deformações tangenciais. Os extensômetros foram posicionados na parte inferior da laje próximo ao pilar, onde se espera as maiores deformações do concreto. A Figura 55 indica o posicionamento dos extensômetros na parte inferior da laje.

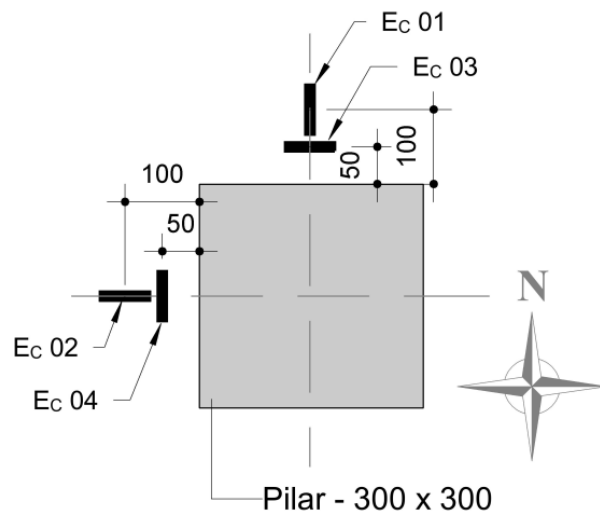


Figura 55 - Instrumentação do concreto na parte inferior da laje (unidades em milímetros)

Para a colocação dos extensômetros na parte inferior da laje (concreto) foi necessário tomar alguns cuidados como: a superfície do concreto foi limpa com algodão e álcool para evitar que micropartículas pudessem atrapalhar a aderência entre o concreto e o extensômetros, evitando assim possíveis erros de leitura. Após a limpeza foi utilizado adesivo instantâneo à base de cianoacrilato para fixar os extensômetros ao concreto, em seguida foram soldadas as saídas do extensômetros aos fios que levam as leituras até o computador. A Figura 56 representa a fixação dos extensômetros na parte inferior da laje.

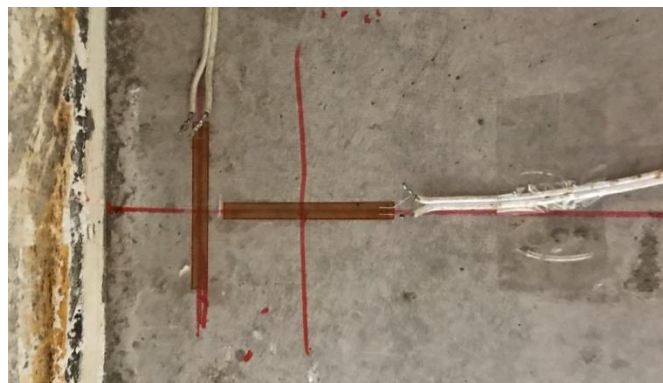


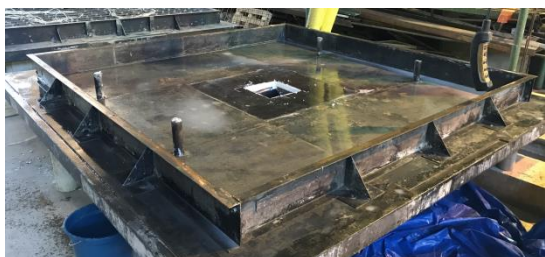
Figura 56 - Extensômetros fixados na parte inferior da laje próximo ao pilar

3.5 CONCRETAGEM

Para a concretagem foram utilizadas formas metálicas quadradas com as dimensões internas específicas das lajes com 2500 mm x 2500 mm x 180 mm. As formas apresentam 1 tramo de pilar quadrado inferior de 600 mm e superior de 800 mm, tendo ainda 4 tubos de PVC de 60 mm dispostos na laje onde serão passados os tirantes que fazem parte do sistema de ensaio. As arestas das formas foram fechadas com silicone e posteriormente foi aplicado desmoldante para facilitar a remoção da laje.

O concreto utilizado no ensaio foi adquirido na concreteira POLIMIX, sendo especificado na compra concreto com F_{ck} de 30 MPa. A concretagem foi realizada por um único lote de concreto, sendo moldados corpos de prova cilíndricos para caracterização do concreto como: ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade a serem realizados no dia de rompimento das lajes.

As barras de aço de flexão, punção, dos pilares e ganchos de ancoragem foram comprado cortado e dobrando sendo somente montados no laboratório. Na Figura 57 temos o procedimento realizado na concretagem.



a) Forma com desmoldante e silicone



b) Ferragem pronta para concretagem



c) Chegada do concreto



d) Realização do SLUMP TEST



e) Início da concretagem



f) Moldagem dos corpos de prova

Figura 57 - Continua



g) Continuação da concretagem



h) Concretagem dos pilares



i) Cura úmida do concreto

Figura 57 - processos realizados no dia da concretagem

A cura do concreto foi feita diariamente por um período de 7 dias, mantendo se uma superfície sempre umedecida para se evitar trincas de retração que é consequência da liberação de calor na hidratação das partículas de cimento.

3.6 ENSAIOS DOS MATERIAIS

3.6.1 Concreto

Para caracterização do concreto foram moldados 15 corpos de prova com dimensões 10 cm de diâmetro e 20 de altura, sendo 6 corpos para serem rompidos a compressão (f_c), 6 corpos para serem rompidos por tração por compressão diametral (f_{ct}) e 3 corpos para ser avaliado o módulo de elasticidade (E_c). Os corpos de prova foram moldados e adensados no dia da concretagem.

As seguintes prescrições normativas foram seguidas:

NBR 5739:2007 – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos;

NBR 7222:2011 – Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos;

NBR 8522:2008 – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

Os rompimentos dos corpos de prova aconteceram no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília, sendo estes ocorridos no dia de rompimento das lajes. Para rompimentos dos corpos de prova foi utilizada a máquina EMIC, como representada na Figura 58.



Figura 58 - Rompimento dos corpos de prova de concreto.

3.6.2 Aço

Para a caracterização do aço foram utilizados 9 barras de aço CA-50, sendo 3 barras de diâmetro de 8,0 milímetros utilizado na armadura de punção, 3 barras de 16,0 milímetros utilizado na armadura de flexão tracionada e 3 barras de 10,0 milímetros utilizado na armadura de flexão comprimida. Os rompimentos dos corpos de prova aconteceram no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília utilizando a máquina EMIC, sendo feito uma média aritmética dos valores encontrados. Na Figura 59 esta representada o sistema utilizado no ensaio do aço.



Figura 59 - Rompimento dos corpos de prova do aço

3.7 RESISTÊNCIA A FLEXÃO DAS LAJES

Para o cálculo da resistência a flexão das lajes foi utilizado o método proposto por Guandalini (2009), que está fundamentado na ocorrência de charneiras plásticas ao longo de linhas de ruptura. Na teoria das charneiras plásticas o momento fletor se iguala ao momento de plastificação da laje, dividindo as em partes rígidas e planas. O colapso ocorre quando as linhas de ruptura formam um mecanismo deformável. A Figura 60 apresentam as linhas de ruptura proposto por Guandalini (2009).

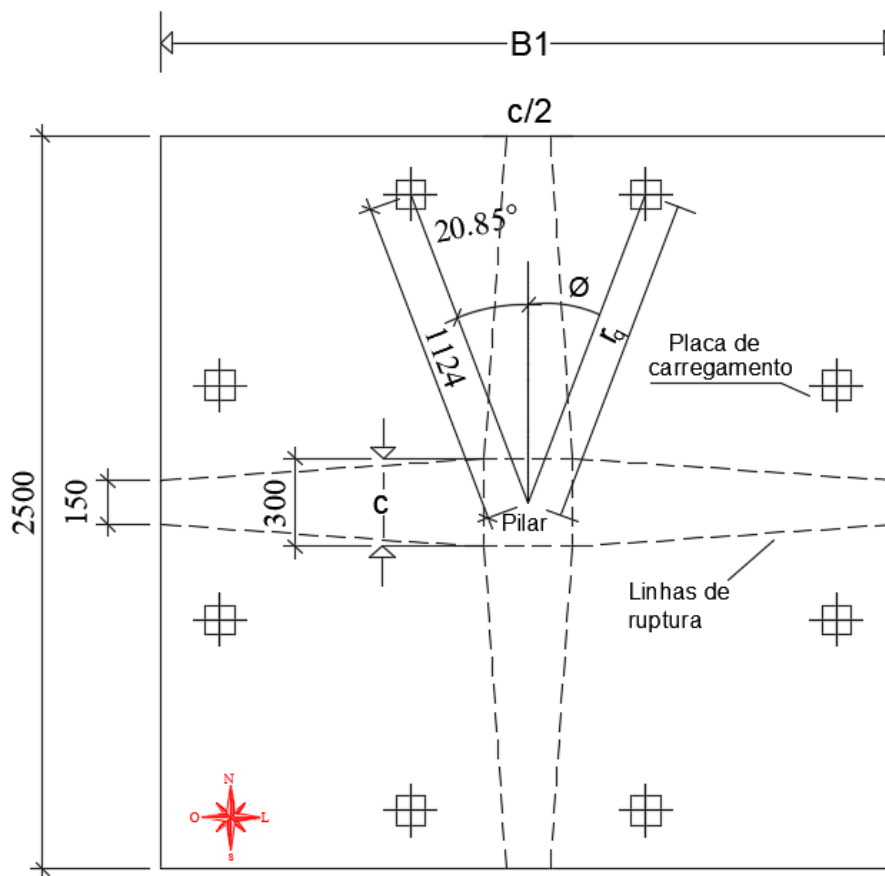


Figura 60 - Linhas de ruptura para as lajes da pesquisa (unidades em milímetros), adaptado - GUANDALINI et. al., (2009)

A seguir esta representada a formulação para o cálculo da resistência a flexão das lajes proposto pelo autor.

$$V_{FLEXÃO} = \frac{4 \cdot m_R}{r_{q \cdot (\cos \phi + \sin \phi)} - c} \cdot \frac{B_1^2 - B_1 \cdot c - \frac{c^2}{4}}{B_1 - c} \quad (3.1)$$

Sendo:

B_1 : comprimento do lado da laje, sendo nesta pesquisa 2500 mm;

c : comprimento do lado do pilar, sendo nesta pesquisa 300 mm;

r_q : distância do centro do pilar ao ponto de aplicação da carga, sendo nesta pesquisa 1124 mm;

ϕ : ângulo em relação ao eixo central da laje e o eixo r_q , sendo nesta pesquisa 20,85°;

m_R : momento resistente da seção transversal da laje com largura unitária.

Para o cálculo do momento resistente será utilizado a formulação da NBR 6118 (2014) descrita no livro de João Carlos Teatini, Estrutura de Concreto Armado 3 edição. No caso experimental será utilizada a tensão de pico do diagrama parábola retângulo igual a $0,95 \cdot f_c$ ao invés de $0,85 \cdot f_c$ utilizado pela NBR 6118 (2014), pois será desconsiderado a diminuição de resistência do concreto sob ações de longa duração correspondente a 27% e o crescimento da resistência após 28 dias correspondente a 22%. Na Figura 61 estão representadas as tensões para um comprimento unitário de laje.

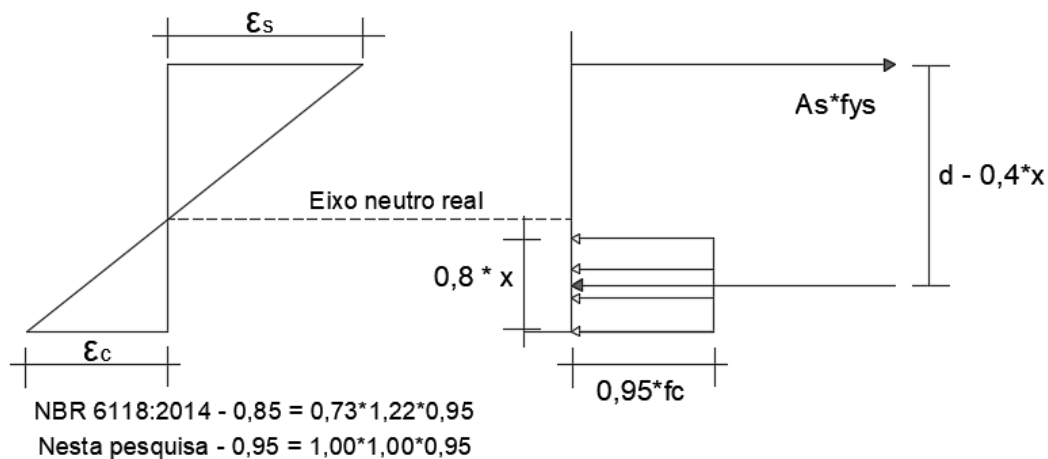


Figura 61 - Tensões no ELU

A seguir está representada a equação para cálculo do momento resistente.

$$M_R = 0,95 f_c \cdot (0,8 \cdot x) \cdot b_w \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad (3.2)$$

Onde:

$$x = \frac{(A_s \cdot f_{ys})}{0,95 \cdot 0,8 \cdot f_c \cdot b_w} \quad (3.3)$$

Sendo:

f_c : a resistência a compressão do concreto;

x : é a altura da linha neutra em relação a fibra mais comprimida;

b_w : é o comprimento unitário de faixa da laje;

d : é a altura útil da laje;

A_s : é a área de aço no comprimento unitário da faixa;

f_{ys} : é a tensão de escoamento do aço.

Na Tabela 15 segue os resultados teóricos da resistência à flexão e os resultados experimentais obtidos nos ensaios.

Tabela 13 - Modo de resistência a flexão.

Lajes	m_R (Kn.m)	F_c (Mpa)	d (cm)	A_s (cm ²)	F_{ys} (MPa)	V_{flex} (kN)	V_u (kN)	Tipo de ruptura
RSP	96,40	29,9	14,79	13	549	834,50	478,8	Punção
FS-1	95,83	29,9	14,71	13	549	829,57	535,1	Punção
FS-2	96,54	29,9	14,81	13	549	835,73	554,8	Punção
FS-3	96,47	29,9	14,80	13	549	835,12	534,2	Punção

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS NORMATIVOS

Foram calculadas as cargas últimas previstas pelas normas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e EUROCODE 2 (2004). As cargas últimas normativas e cargas últimas experimentais estão representadas nas Tabelas 16, 17 e 18.

Tabela 14 - Resultados teóricos da norma ABNT NBR 6118 (2014)

ABNT NBR 6118 (2014)						
Lajes	Carga Resistente em C	Carga Resistente em C'	Carga Resistente em C'	Carga Resistente em C''	Carga Estimada	Carga última experimental
MODELOS	$V_{r,máx}$ (kN)	$V_{r,c}$ (kN)	$V_{r,Asw}$ (kN)	$V_{r,out}$ (kN)	V_{NBR} (kN)	V_{EXP} (kN)
RSP	1261,4	536,7	-	-	536,7	478,8
FS - 1	1254,6	-	765,4	729,1	729,1	535,1
FS - 2	1263,1	-	769,9	733,5	733,5	554,8
FS - 3	1262,3	-	769,5	733,0	733,0	534,2

Tabela 15 - Resultados teóricos da norma EUROCODE 2 (2004)

EUROCODE 2 (2004)						
Lajes	Carga Resistente em U	Carga Resistente em U_0	Carga Resistente em U_0	Carga Resistente em U_{out}	Carga Estimada	Carga última experimental
MODELOS	$V_{r,máx}$ (kN)	$V_{r,c'}$ (kN)	$V_{r, asw}$ (kN)	$V_{r,out}$ (kN)	$V_{EC,2}$ (kN)	V_{EXP} (kN)
RSP	1121,3	490,9	-	-	490,9	478,8
FS - 1	1115,2	-	731,9	593,9	593,9	535,1
FS - 2	1122,8	-	737,2	598,5	598,5	554,8
FS - 3	1122,0	-	736,7	598,0	598,0	534,2

Tabela 16 - Resultados teóricos da norma ACI 318 (2014)

ACI 318 (2014)						
Lajes	Carga Resistente em U	Carga Resistente em U_0	Carga Resistente em U_0	Carga Resistente em U_{out}	Carga Estimada	Carga última experimental
MODELOS	$V_{r,c}$ (kN)	$V_{r,c'}$ (kN)	$V_{r,asw}$ (kN)	$V_{r,out}$ (kN)	V_{ACI} (kN)	V_{EXP} (kN)
RSP	478,1	724,5	-	-	478,1	478,8
FS - 1	474,7	-	555,1	530,4	530,4	535,1
FS - 2	479,0	-	559,4	534,4	534,4	554,8
FS - 3	478,6	-	558,9	533,9	533,9	534,2

Na Figura 62 segue um gráfico comparativo entre os resultados teóricos encontrados pelas normas em análise e os resultados experimentais obtidos do laboratório.

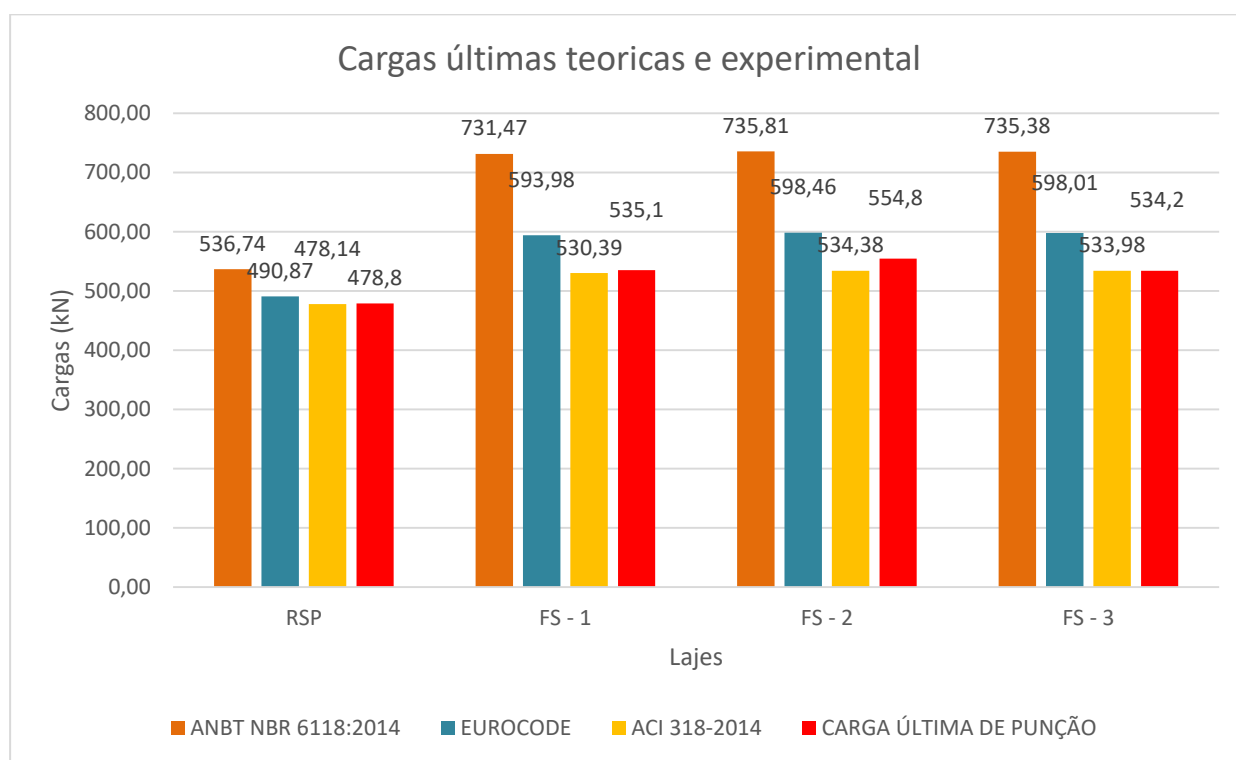


Figura 62 - Resultados experimentais e teóricos normativos

Analisando as cargas últimas de punção verifica-se um aumento na resistência aproximado de 11,76% na laje FS-1, que tem a armadura de punção ancorada na armadura de flexão tracionada e comprimida, se comparada com a laje RSP de referência sem armadura de punção. Verifica-se também que a carga última da laje FS-1 possuiu praticamente a mesma

carga última de punção em relação à laje FS-3, que possui armadura de punção sem ancoragem na armadura de flexão tracionada e comprimida, sendo essa variação de 0,17%. Por último verifica-se que a laje FS-2, com armadura de punção ancorada somente na armadura de flexão comprimida e apoiada na armadura de flexão tracionada possui um aumento de carga última de 3,68% e 15,87% se comparados com as lajes FS-1 e RSP respectivamente.

Esses resultados evidenciam a importância da utilização da armadura de punção para aumento da resistência no combater a punção em lajes lisas, tendo um acréscimo de carga de 13%, em média, ao se comparar com a laje sem armadura de punção. Os resultados também sinalizam que a utilização desta armadura totalmente ancorada na laje FS-1 não apresentou melhor comportamento como era de se esperar, pois possui praticamente a mesma carga última da laje com armadura de punção sem ancoragem na laje FS-3 e carga última inferior à laje com armadura parcialmente ancorada laje FS-2.

Analisando os resultados teóricos normativos verifica-se que o ACI tem uma maior precisão na estimativa de ruptura à punção, cerca de 0,1% a favor da segurança para a laje RSP sem armadura de punção e cerca de 0,9% ; 3,8% e 0,04% a favor da segurança para as lajes com armadura de punção FS-1, FS-2 e FS-3, respectivamente.

Para o EUROCODE 2 verifica-se que todos os resultados foram maiores que as cargas experimentais sendo 2,5% para as lajes RSP sem armadura de punção e, 11,0%; 7,9% e 11,9% para as lajes FS-1, FS-2 e FS-3 com armadura de punção, respectivamente.

A ABNT NBR 6118 apresentou resultados superiores se comparados com as cargas últimas das lajes. Nas estimativas de carga de ruptura sendo 12,1% acima para a laje RSP sem armadura de punção e, 36,7%; 32,6% e 37,7% acima para as lajes FS-1, FS-2 e FS-3 com armadura de punção, respectivamente.

4.2 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Para o cálculo dos deslocamentos verticais foram utilizados 12 LVDT's posicionados na parte superior da laje, sendo 6 na direção sul norte e 6 na direção oeste leste. Em todos os experimentos os LVDT's foram posicionados nas mesmas posições da laje para que se possa ter um parâmetro de comparação entre as lajes. Os LVDT's começam a captar as leituras a partir do início do experimento e tiveram suas leituras interrompidas no momento da ruptura. As cargas aplicadas foram medidas a cada passo de carga, sendo também os deslocamentos representados a cada passo de 20% da carga última, como representados nos gráficos subsequentes.

4.2.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LAJE DE REFERÊNCIA RSP

As Figuras 63 e 64 representam os deslocamentos verticais da laje de referência (RSP) na direção oeste-leste e sul norte, respectivamente. A laje de referência não possui armadura de punção em sua constituição.

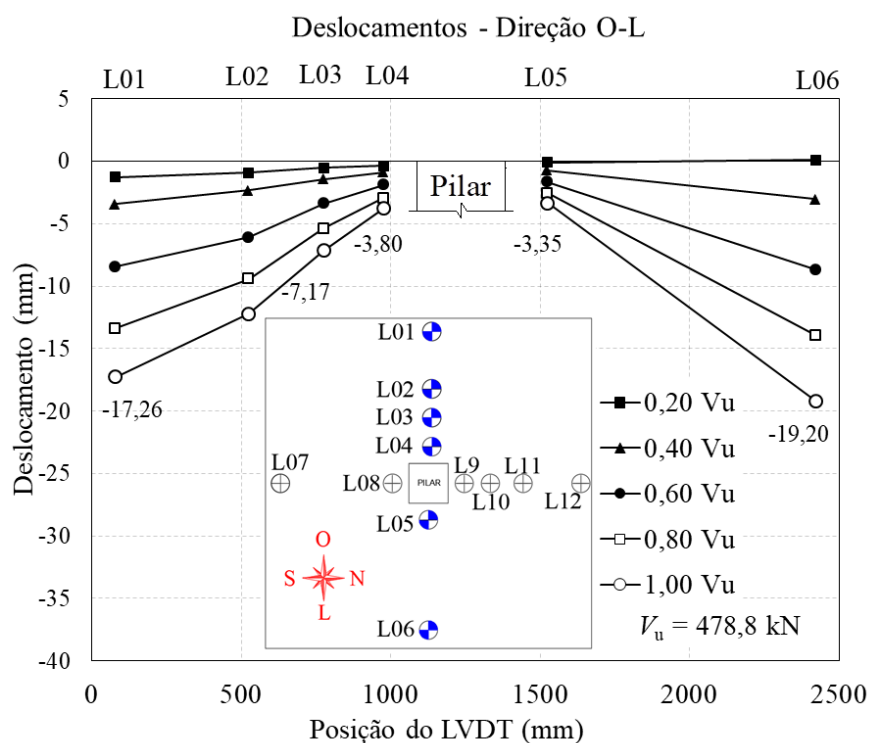


Figura 63 - Representação dos deslocamentos na direção Oeste – Leste

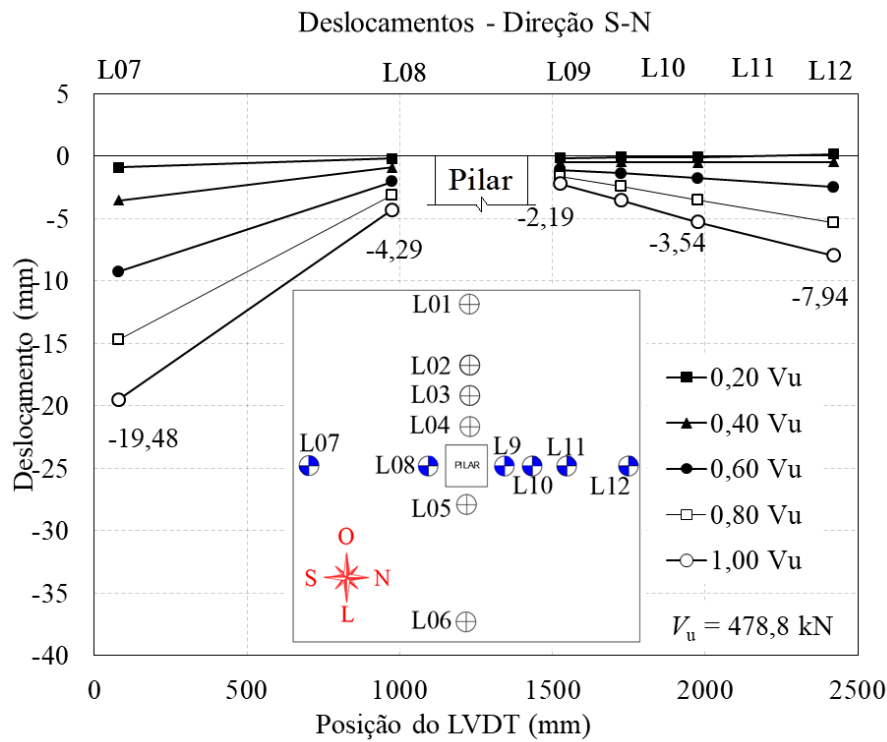


Figura 64 - Representação dos deslocamentos na direção Sul – Norte

4.2.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LAJE FS-1

A laje FS-1 possui armadura de punção ancorada na armadura de flexão tracionada e comprimida. Os deslocamentos verticais da laje FS-1 estão representados nas Figuras 65 e 66.

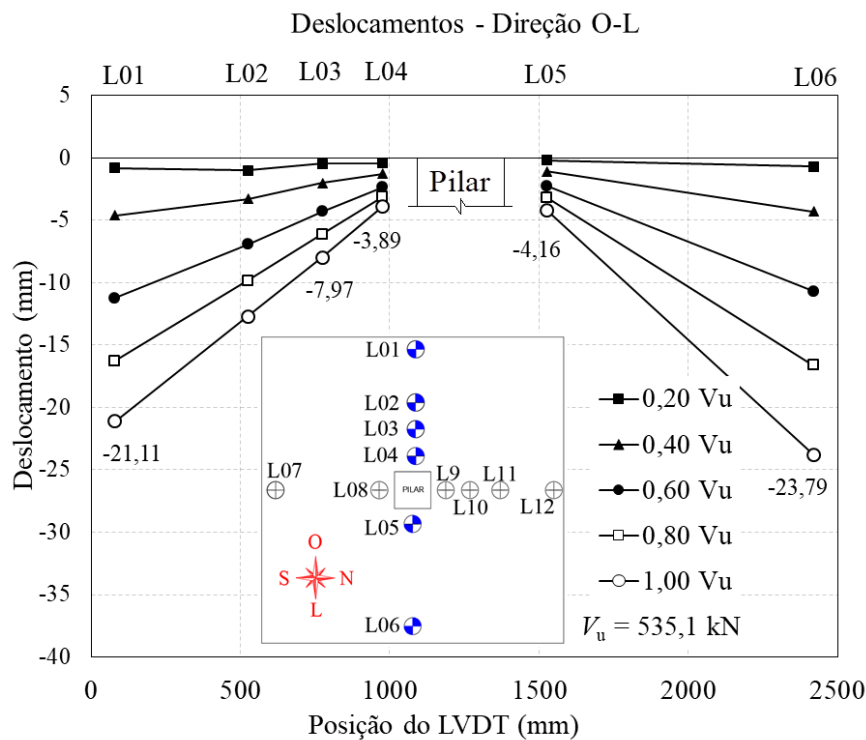


Figura 65 - Representação dos deslocamentos na direção Oeste – Leste

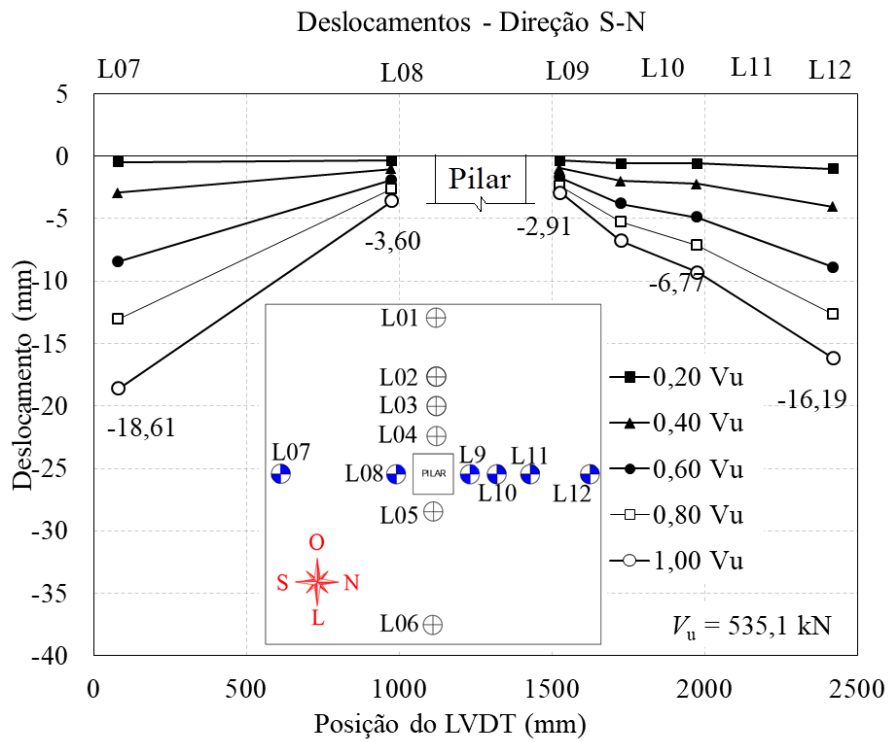


Figura 66 - Representação dos deslocamentos na direção Sul – Norte

4.2.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LAJE FS-2

Na laje FS-2 a armadura de punção é ancorada na armadura de flexão comprimida e apoiada na armadura de flexão tracionada. Os deslocamentos verticais da laje FS-2 estão representados nas Figuras de 67 e 68.

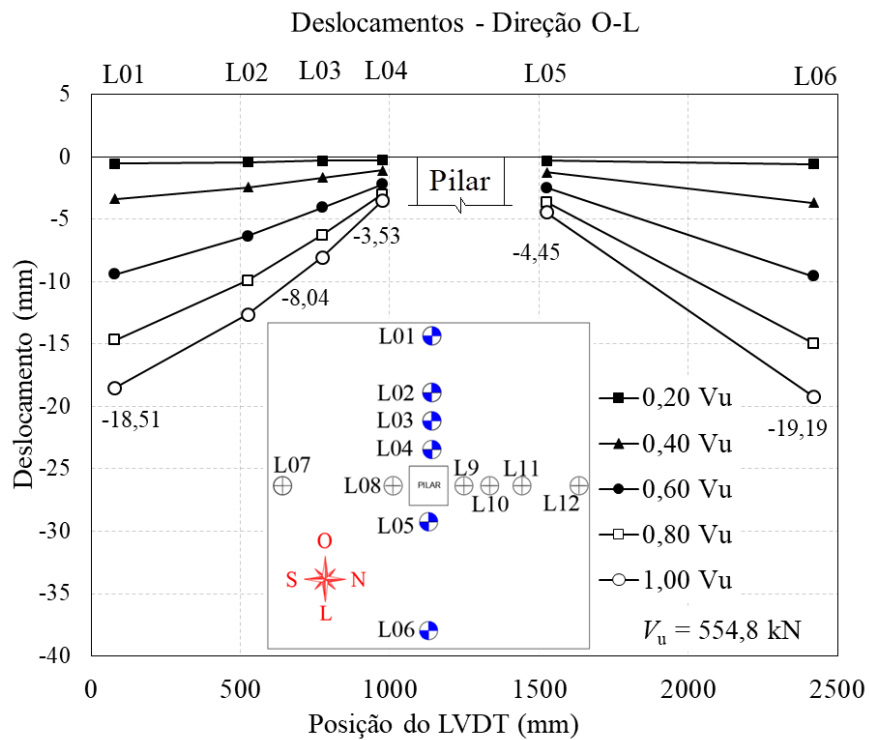


Figura 67 - Representação dos deslocamentos na direção Oeste Leste

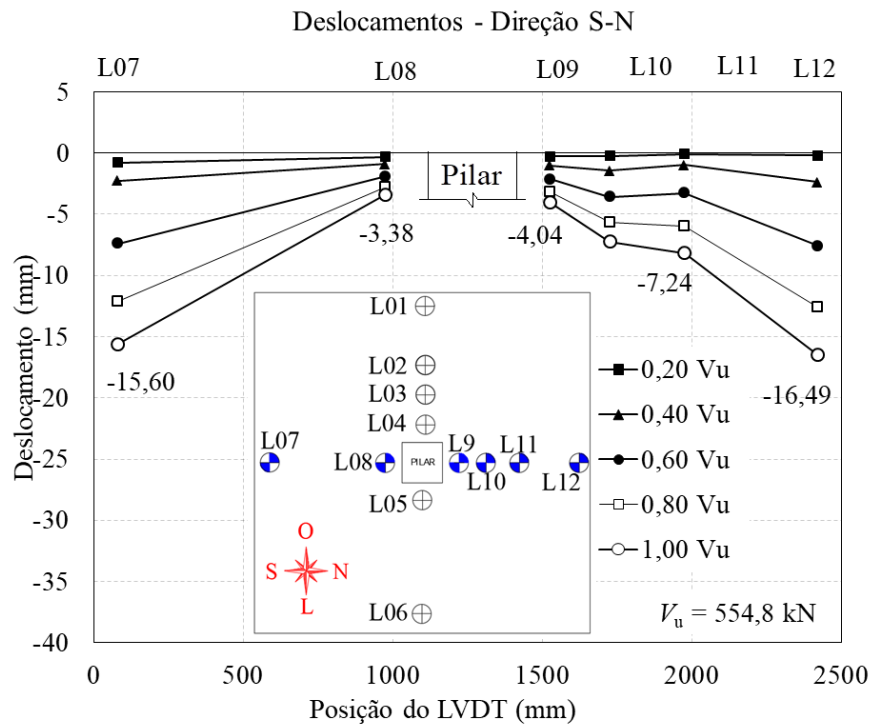


Figura 68- Representação dos deslocamentos na direção Sul - Norte

4.2.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LAJE FS-3

Na laje FS-3 a armadura de punção não possui ancoragem, sendo somente apoiada na armadura de flexão superior e inferior. Os deslocamentos verticais da laje FS-3 estão representados nas Figuras de 69 e 70.

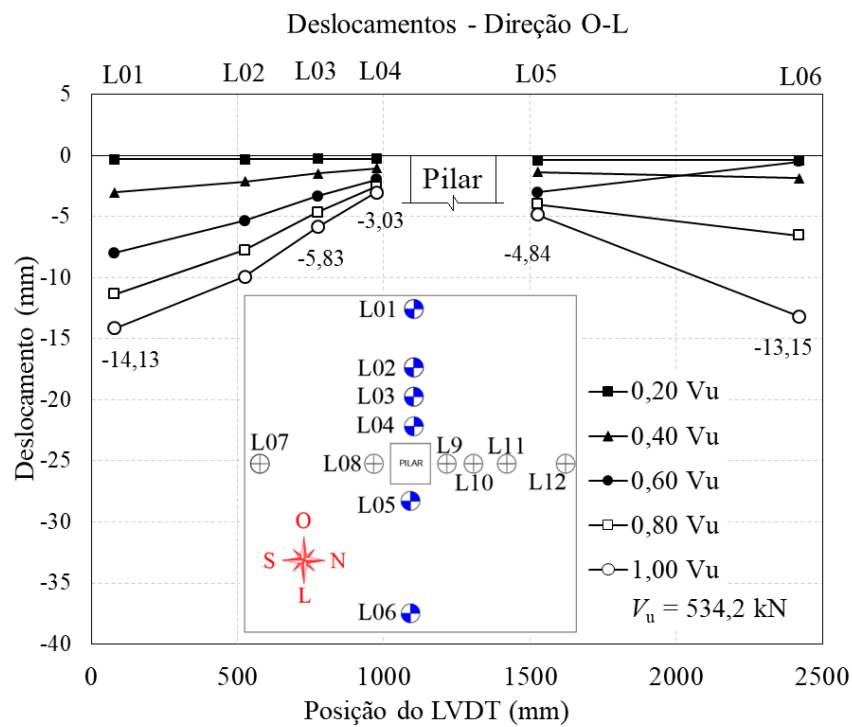


Figura 69 - Representação dos deslocamentos na direção Oeste Leste

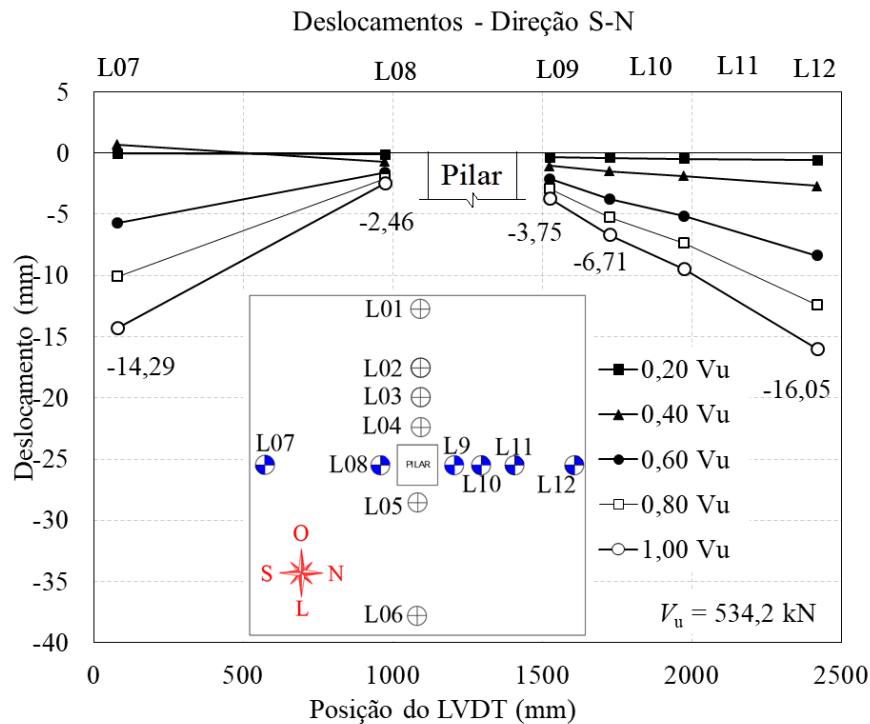


Figura 70 - Representação dos deslocamentos na direção Sul – Norte

A partir dos resultados verifica-se um aumento gradativo dos deslocamentos verticais das lajes FS-3, FS-2 e FS-1 respectivamente. Isso significa que a laje FS-1, com armadura de punção ancorada nas armaduras de flexão tracionada e comprimida possui maior ductilidade, pois possuem maiores deslocamentos verticais cerca de 14,2% e 38,4% se comparadas com as lajes FS-2 e FS-3 respectivamente. Essa ductilidade é consequência do entrelaçamento das armaduras de punção e flexão.

Verifica-se também uma anomalia nos deslocamentos verticais relativos aos LVDT's 6 e 7, verificados nas figuras 69 e 70. Esses deslocamentos no sentido contrario dos LVDT's são explicados pela acomodação da laje durante o ensaio.

Na figura 71 abaixo são apresentados os deslocamentos médios dos LVDT's das extremidades para as lajes pesquisadas.

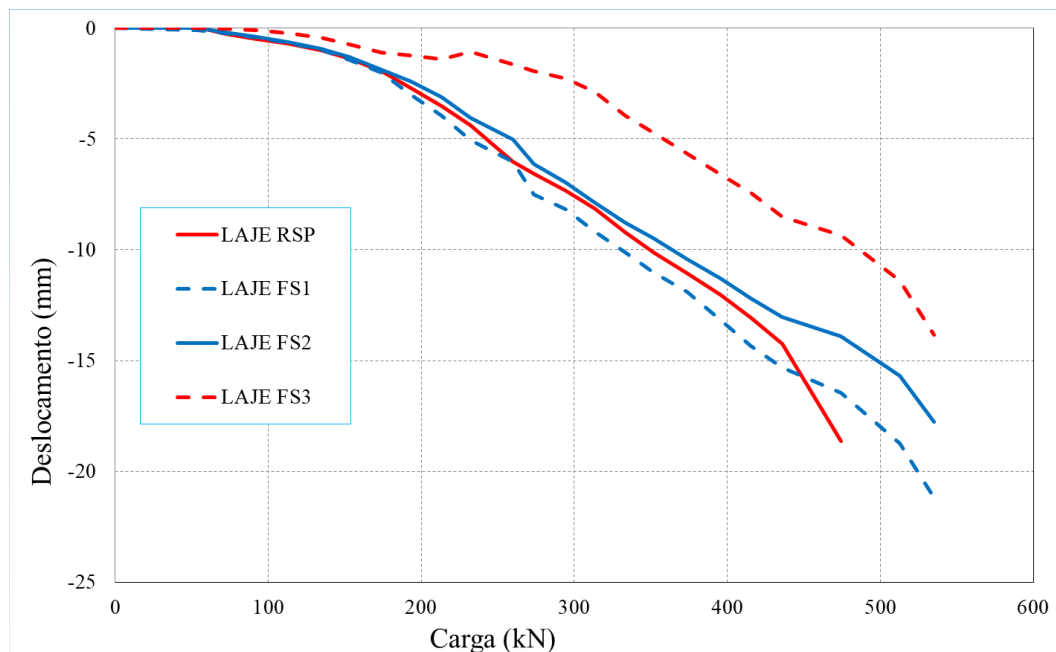


Figura 71 - Deslocamentos médios dos LVDT's das extremidades das lajes.

4.3 DEFORMAÇÃO NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO

4.3.1 DEFORMAÇÃO NO CONCRETO NA LAJE DE REFERÊNCIA RSP

Para medir as deformações mais elevadas na superfície do concreto os extensômetros foram fixados próximos à face inferior do pilar onde temos as maiores deformações, sendo: Ec01 e Ec02 medindo as deformações radiais e Ec03 e Ec04 medindo as deformações tangenciais. Na Figura 72 estão representadas as posições dos extensômetros e as deformações na superfície do concreto para a laje de referência RSP.

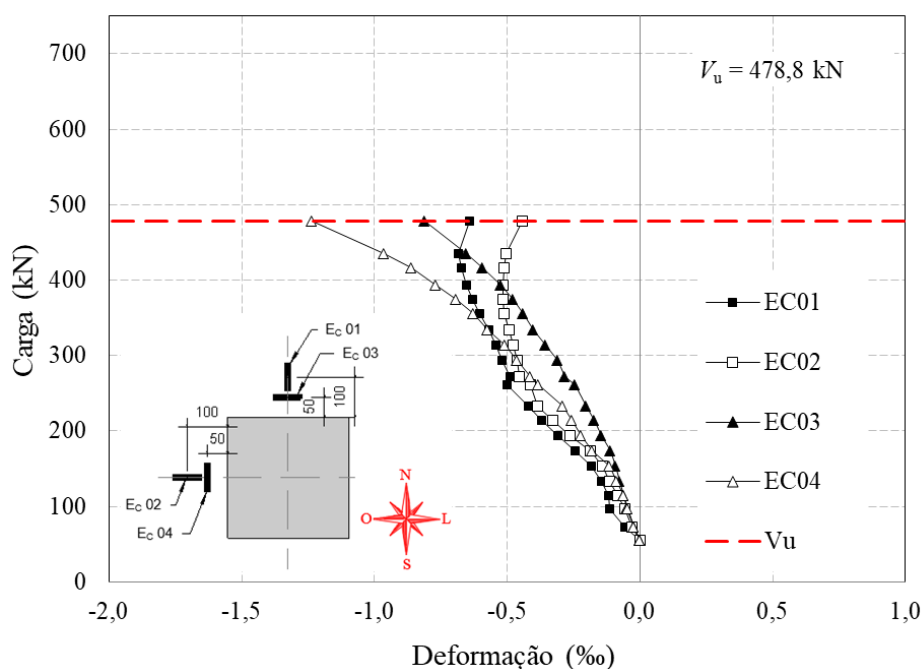


Figura 72 - Deformações tangenciais e radiais no concreto

4.3.2 DEFORMAÇÃO NO CONCRETO NA LAJE FS-1

Na Figura 73 estão representadas as deformações tangenciais e radiais do concreto na laje FS-1.

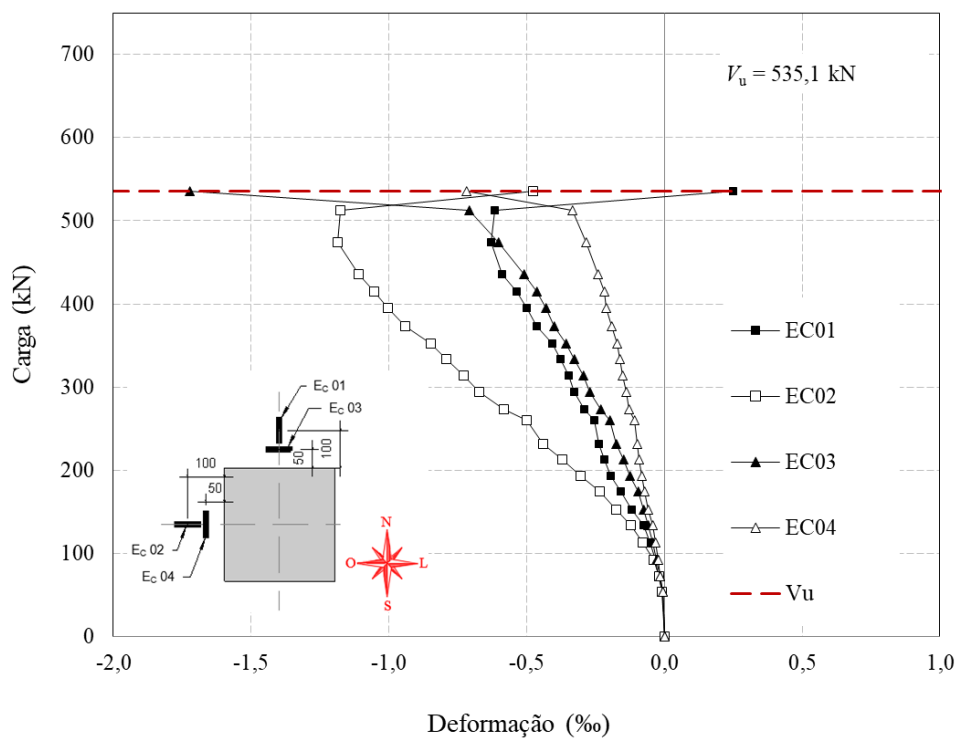


Figura 73 - Deformações tangenciais e radiais no concreto

4.3.3 DEFORMAÇÃO NO CONCRETO NA LAJE FS-2

A Figura 74 representa as deformações tangenciais e radiais da laje FS-2.

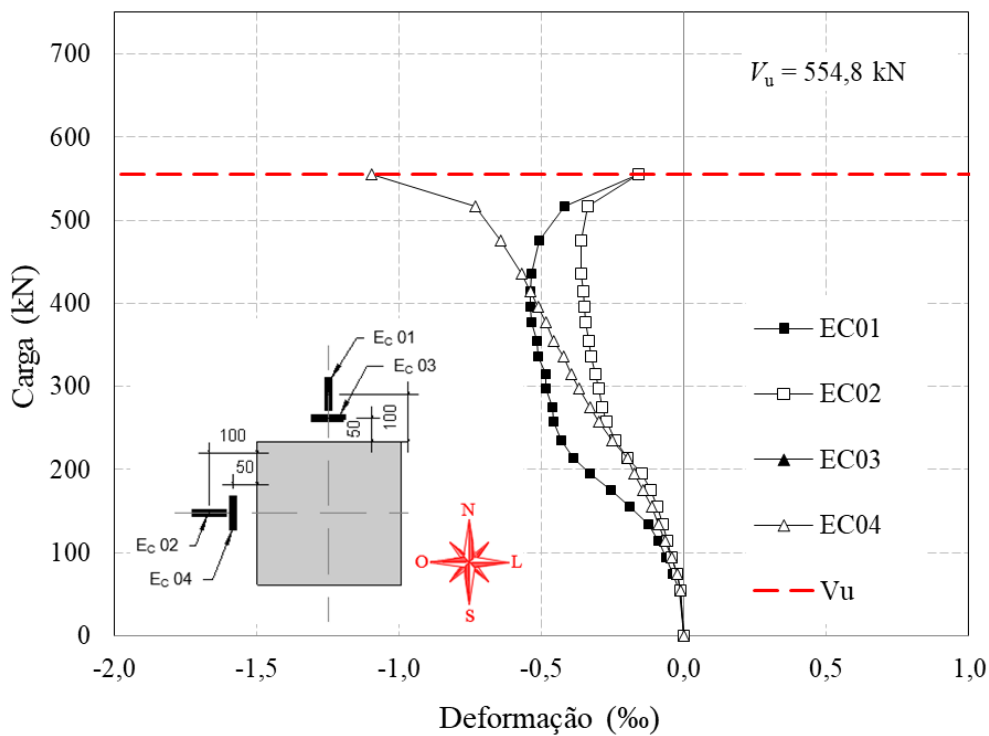


Figura 74 - Deformações tangenciais e radiais no concreto

4.3.4 DEFORMAÇÃO NO CONCRETO NA LAJE FS-3

A Figura 75 representa as deformações tangenciais e radiais da laje FS-3.

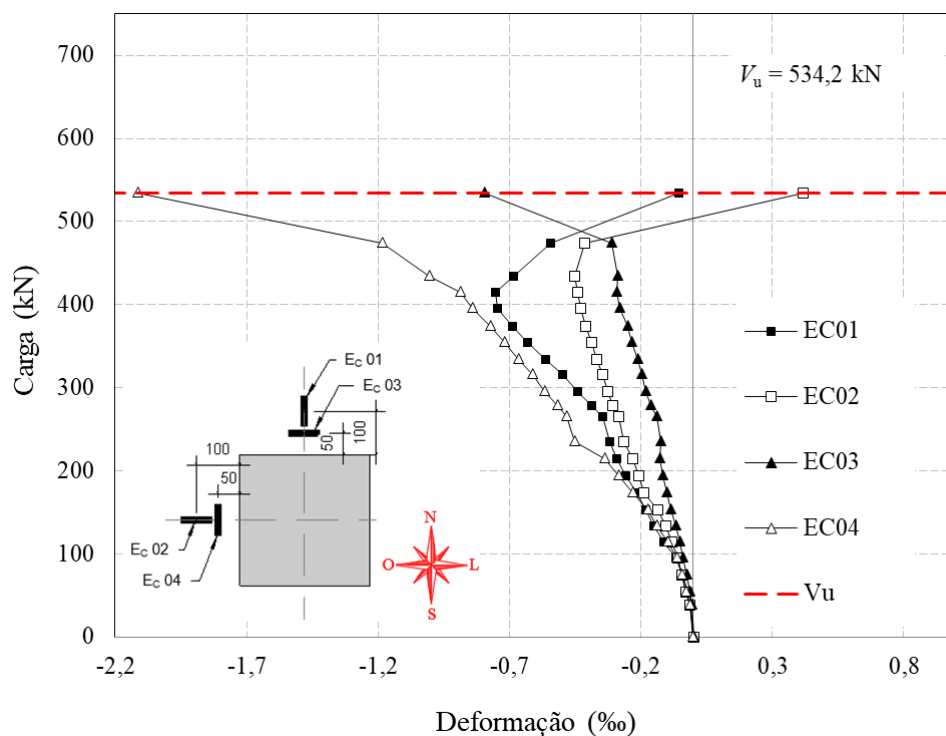


Figura 75 - Deformações tangenciais e radiais no concreto

Nos gráficos 76 e 77 são apresentados uma média aritmética das deformações tangenciais e radiais de cada laje respectivamente.

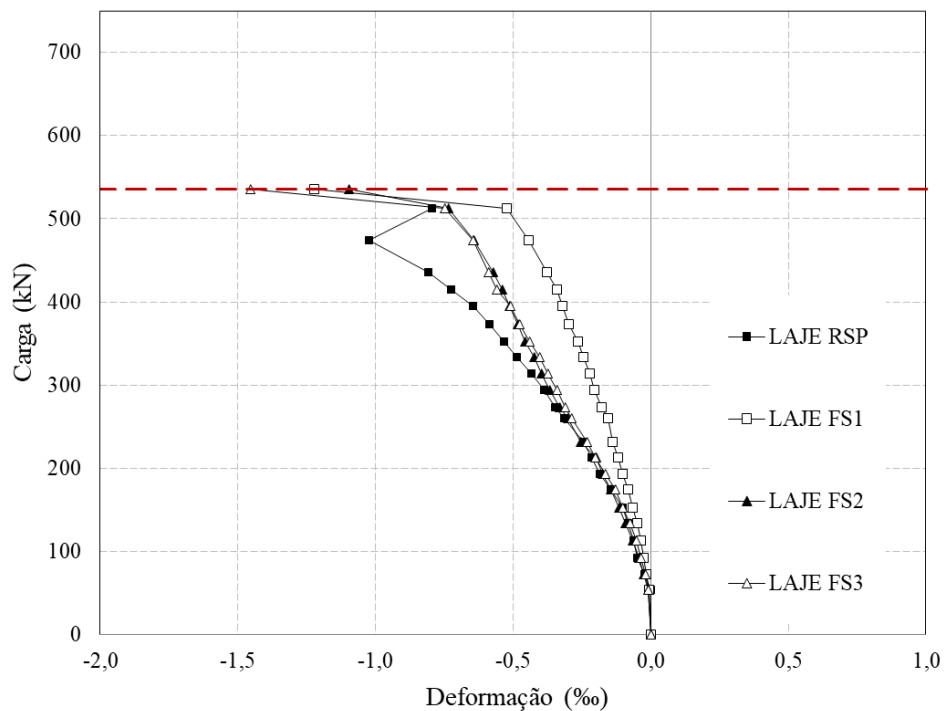


Figura 76 - Média das deformações tangenciais de cada laje.

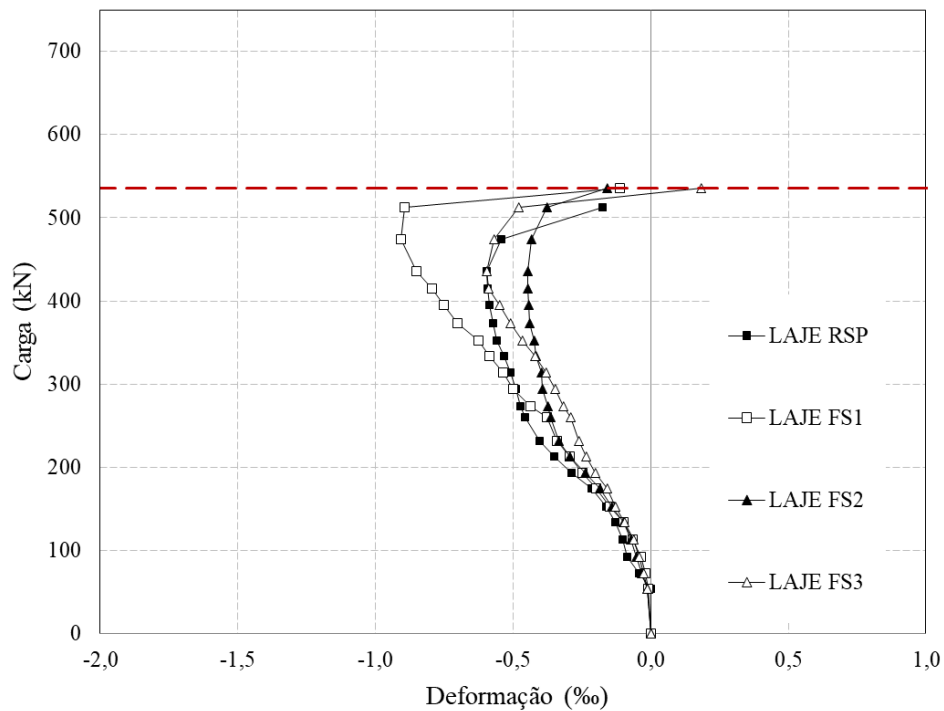


Figura 77- Média das deformações radiais de cada laje.

Observados os gráficos das deformações da superfície do concreto foi verificado que nenhuma das lajes o concreto chegou ao limite de esmagamento que corresponde a 3,5‰. A maior deformação foi verificada na laje FS-3, com armadura de punção sem ancoragem, que apresentou deformações na superfície do concreto próximo ao limite de escoamento que corresponde a 2‰.

Observa se também que até o aparecimento das primeiras fissuras com carga aproximada de 220 kN as deformações tangenciais e radiais apresentam valores semelhantes, logo após havendo valores mais elevados para as deformações tangenciais. A partir de aproximadamente 70% da carga última ate próximo à ruptura foi observado um alívio das tensões radiais chegando ate a passar de compressão para tração como pode ser observado na deformação da laje FS-3. Segundo Muttoni (2008) esses alívios ocorrem pela formação de bielas devido ao surgimento de fissuras críticas de punção que alteram as distribuições de tensões próximas ao pilar.

4.4 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO

Para medir as deformações das armaduras de flexão foram instrumentadas 7 barras de flexão tracionadas, sendo 4 barras na direção oeste leste e 3 barras na direção sul norte.

Para garantir que não tenha perda de dados por falhas de extensômetros foram instalados 2 extensômetros em cada ponto. O posicionamento dos extensômetros se deu nas partes laterais da barra diametralmente opostas. As deformações dos extensômetros foram tomadas como a média aritmética dos extensômetros de cada barra, sendo plotadas graficamente a cada 20% da carga de ruptura.

Na Figura 78 temos uma representação da posição dos extensômetros nas lajes.

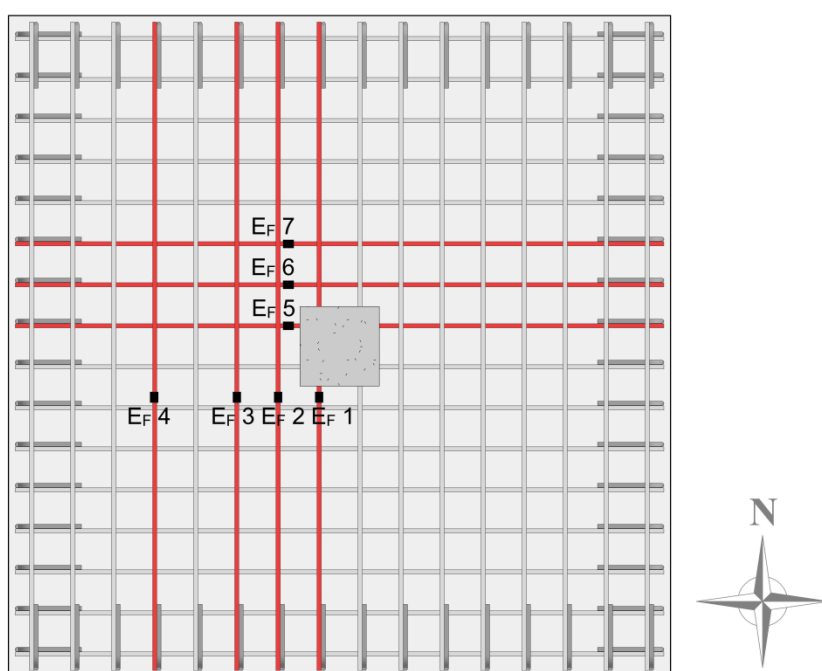


Figura 78 - Posição dos extensômetros nas armaduras de flexão tracionadas.

Nas Figuras 79 a 90 estão representadas as deformações nas armaduras de flexão das lajes RSP, FS-1, FS-2 e FS-3 respectivamente.

4.4.1 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO LAJE RSP

As Figuras de 79 e 80 apresentam as deformações nas armaduras de flexão da laje RSP.

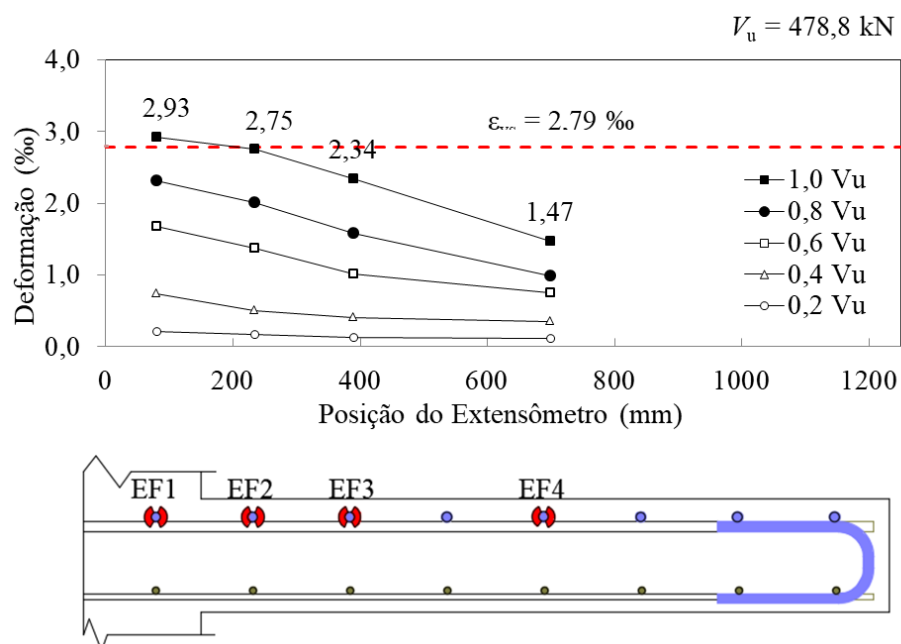


Figura 79 - Representação das deformações na direção oeste leste da armadura de flexão

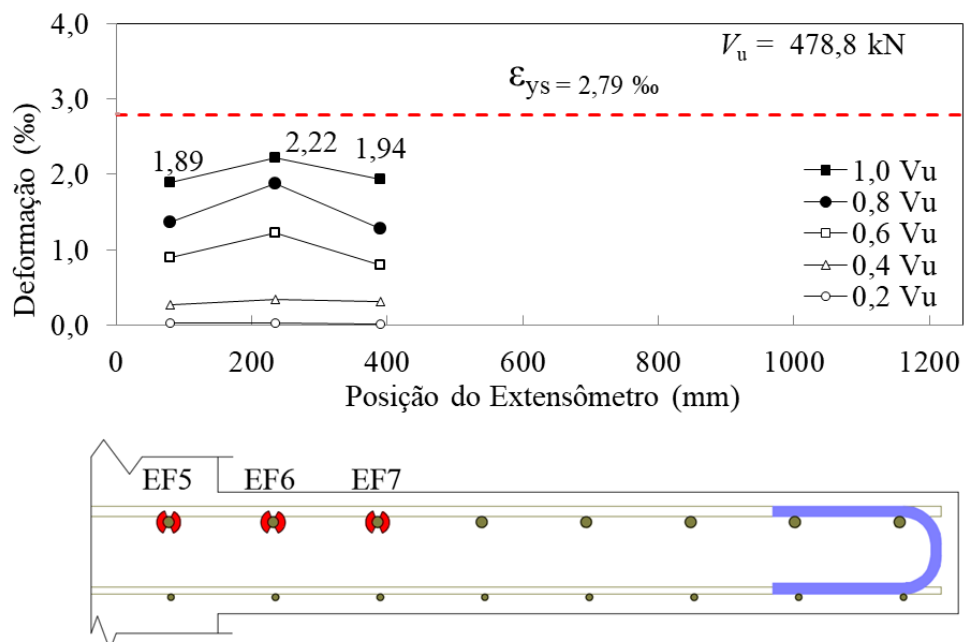


Figura 80 - Representação das deformações na direção norte sul da armadura de flexão

Na Figura 81 representam as deformações de todos os extensômetros das armaduras de flexão em função da carga aplicada.

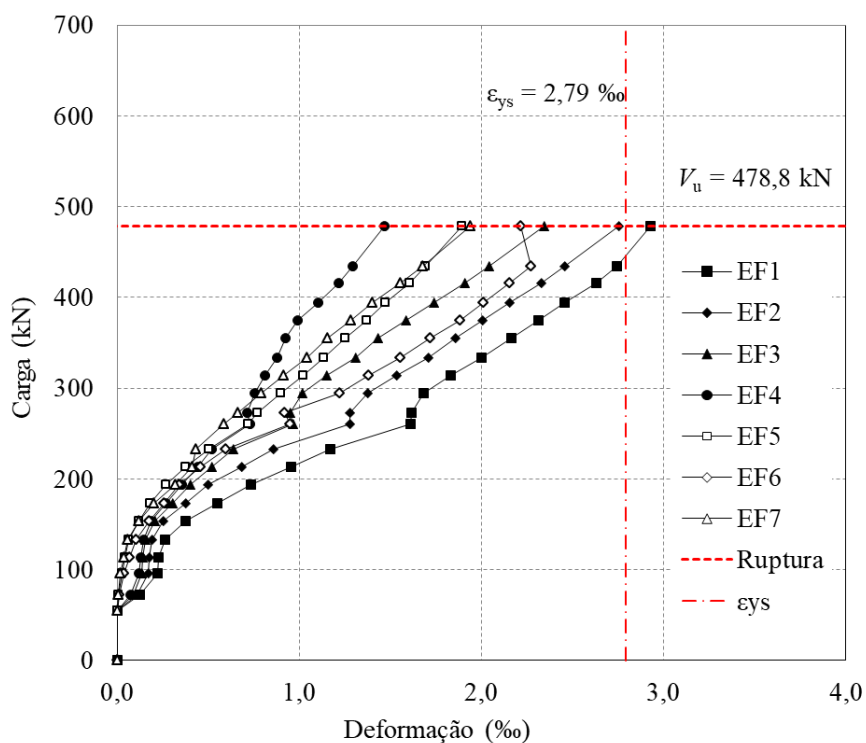


Figura 81 - Deformação dos extensômetros em função da carga

4.4.2 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO LAJE FS-1

As Figuras de 82 e 83 representam as deformações nas armaduras de flexão da laje FS-1.

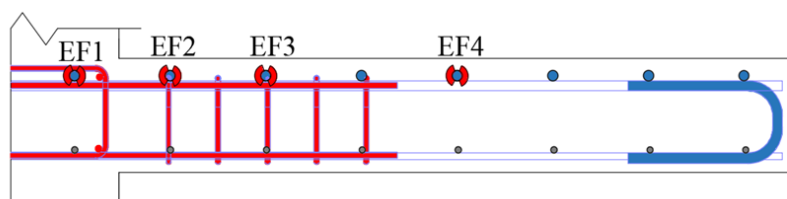
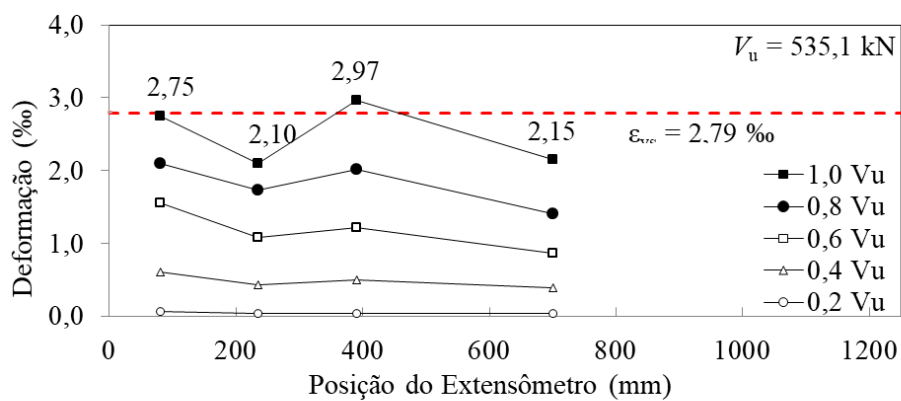


Figura 82 - Representação dos extensômetros na direção oeste leste da armadura de flexão

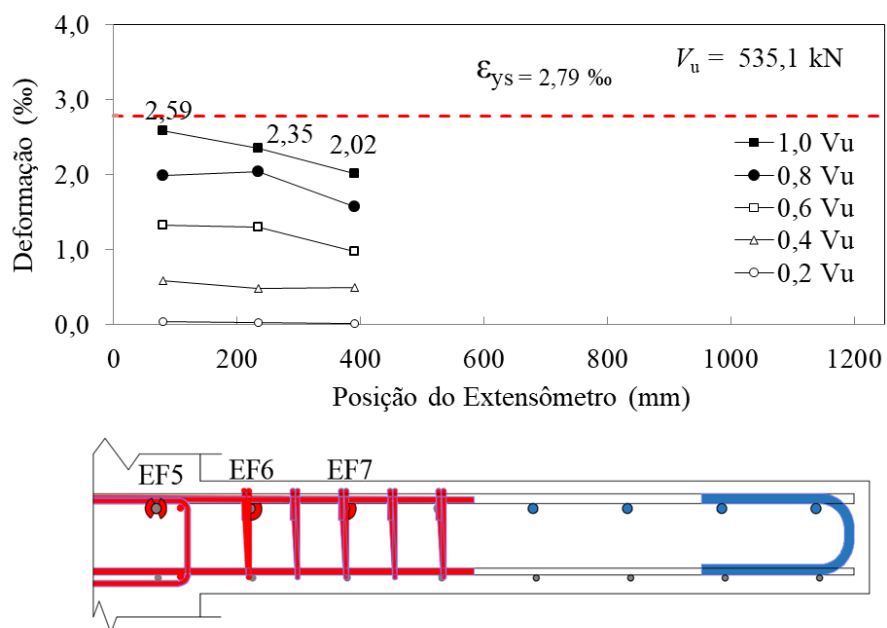


Figura 83 - Representação dos extensômetros na direção norte sul da armadura de flexão

Na Figura 84 são representadas as deformações de todos os extensômetros das armaduras de flexão em função da carga aplicada.

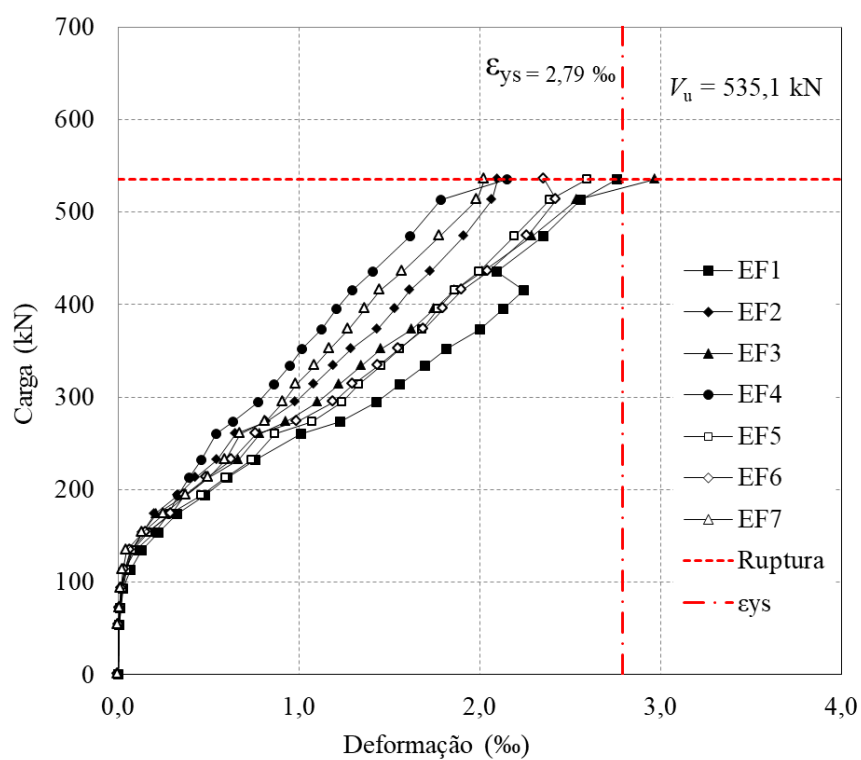


Figura 84 - Deformação dos extensômetros em função da carga

4.4.3 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO LAJE FS-2

As Figuras de 85 e 86 representam as deformações nas armaduras de flexão da laje FS-2.

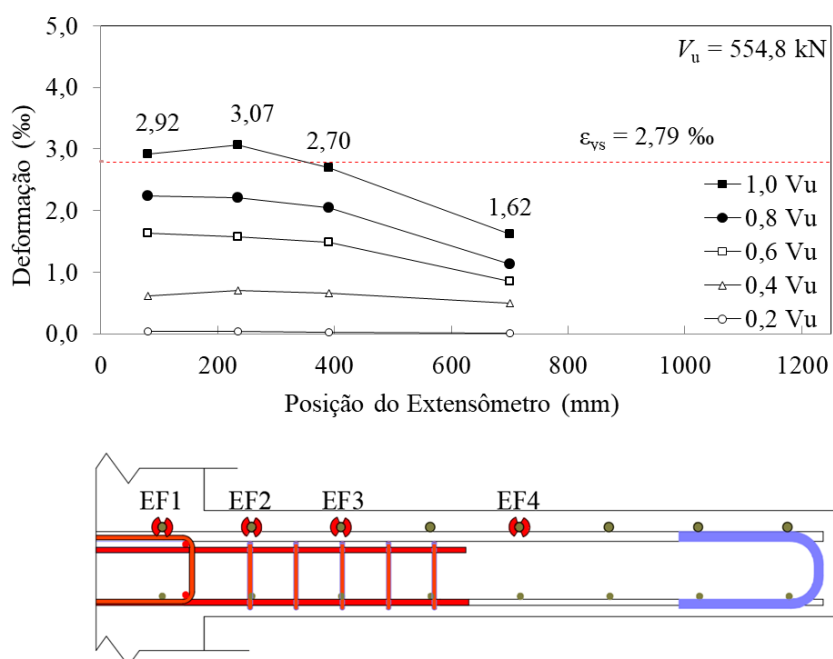


Figura 85 - Representação dos extensômetros na direção oeste leste da armadura de flexão

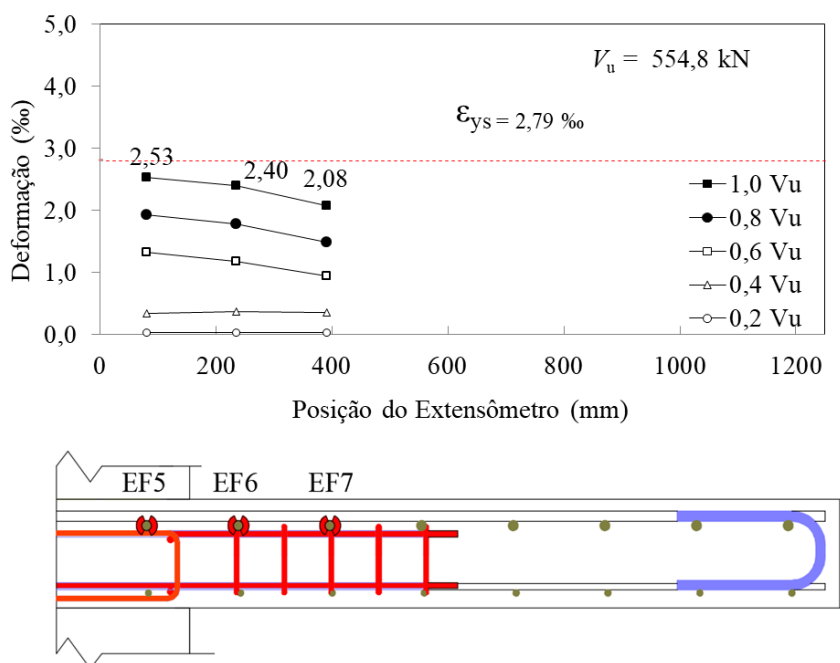


Figura 86 - Representação dos extensômetros na direção norte sul da armadura de flexão

Na Figura 87 são representadas as deformações de todos os extensômetros das armaduras de flexão em função da carga aplicada.

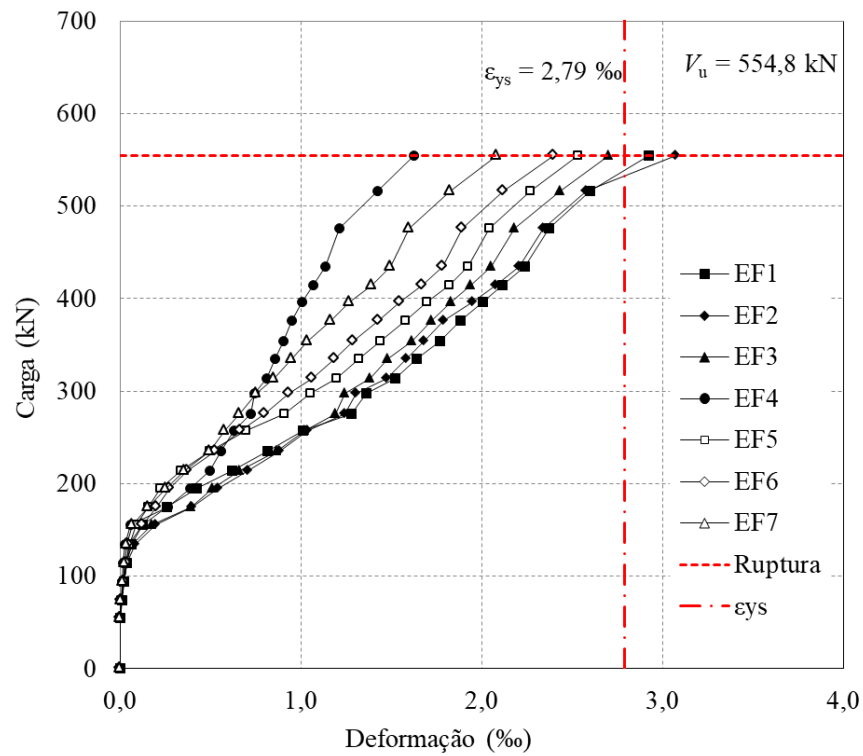


Figura 87 - Deformação dos extensômetros em função da carga

4.4.4 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO LAJE FS-3

As Figuras de 88 e 89 a seguir representam as deformações nas armaduras de flexão da laje FS-3.

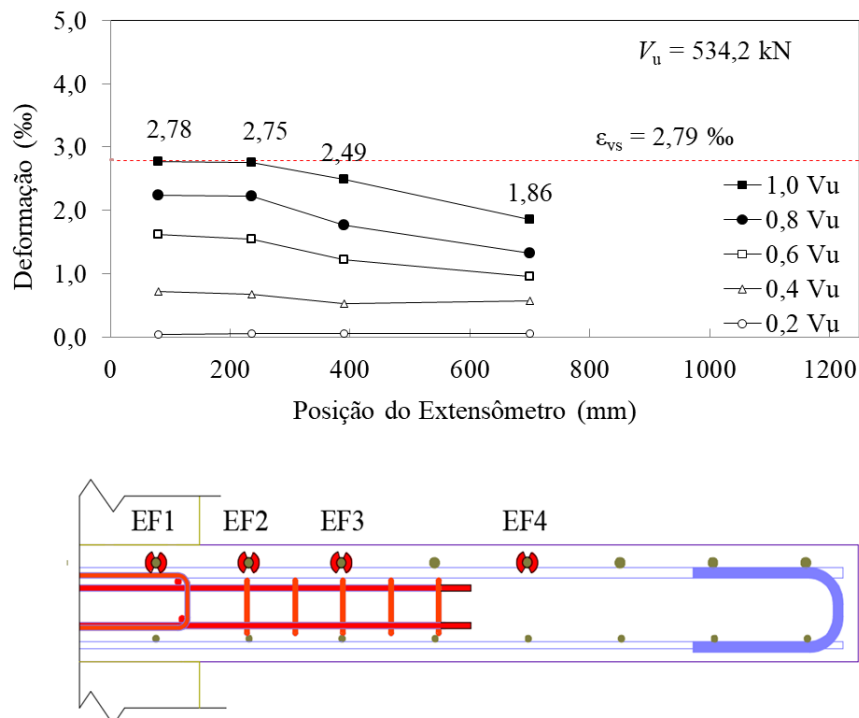


Figura 88 - Representação dos extensômetros na direção oeste leste da armadura de flexão

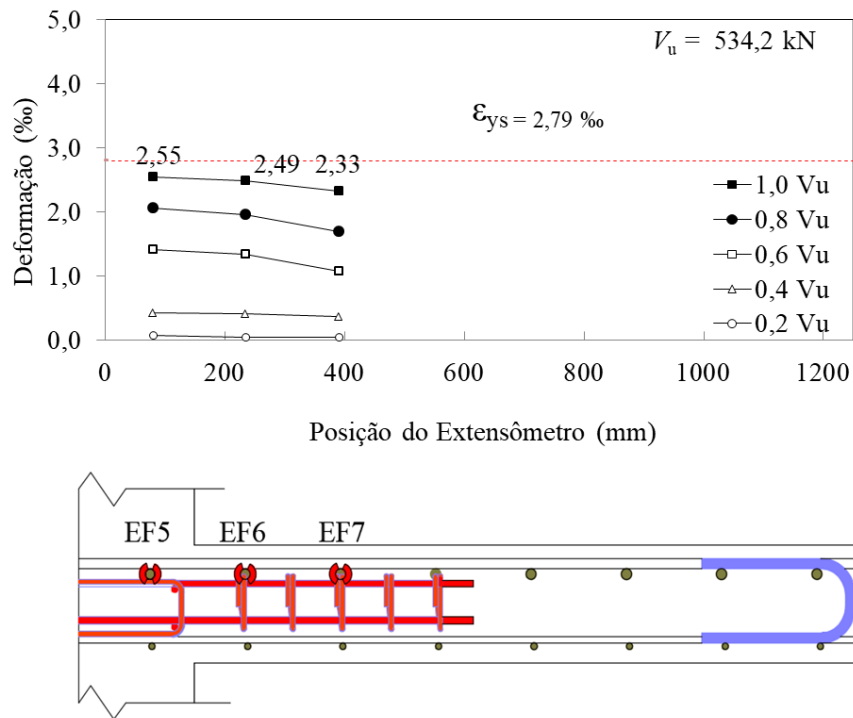


Figura 89 - Representação dos extensômetros na direção norte sul da armadura de flexão

Na Figura 90 são representadas as deformações de todos os extensômetros das armaduras de flexão em função da carga aplicada.

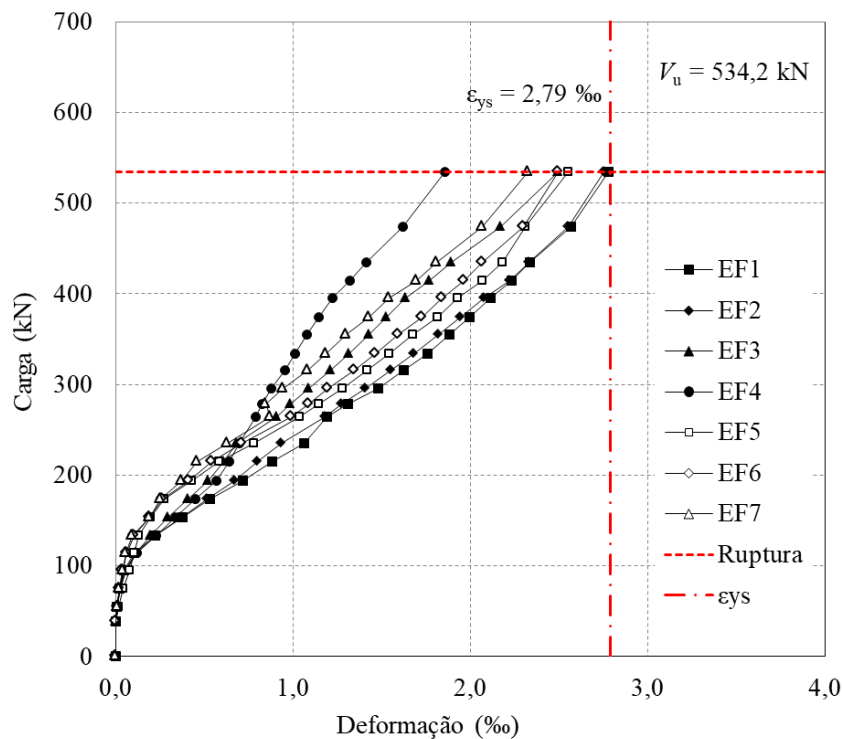


Figura 90 - Deformação dos extensômetros em função da carga

Analizando de forma geral as deformações nas armaduras de flexão verifica-se que quanto mais próximo dos pilares maiores as deformações sofridas, evidenciando que próximo ao pilar teremos as maiores solicitações das armaduras de flexão.

Para a laje de referência RSP tivemos 2 barras atingindo o limite de escoamento 2,79‰ nos extensômetros EF1 e EF2. Os escoamentos dessas duas barras explicam um maior deslocamento da laje RSP se comparada com a laje FS-3, sugerindo que a ruptura da laje não ocorreu exclusivamente por punção, visto a plastificação ocorrida próximo ao pilar.

Analizando a laje FS-1 verifica-se o escoamento da barra referida ao extensômetros EF3, evidenciando que a ruptura desta laje não ocorreu puramente por punção. Verifica-se que o extensômetros EF3 teve uma maior deformação se comparados com os extensômetros EF1 e EF2 isso se explica por forças provenientes de mecanismos complementares intrínsecos do concreto armado.

Na laje FS-2 que teve a maior carga de ruptura tivemos 2 barras de flexão atingindo o escoamento, dos extensômetros EF1 e EF2, sugerindo que a ruptura dessa laje não ocorreu puramente por punção.

Para a laje FS-3 nenhuma barra atingiu o limite de escoamento, logo essa laje teve uma ruptura característica de punção pura. Essa afirmação é evidenciada com os pequenos deslocamentos atingidos pela laje FS-3 no momento da ruptura, caracterizando uma ruptura frágil, rápida e sem avisos, características de rupturas por punção.

4.5 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE PUNÇÃO

Para medir as deformações na armadura de punção foram instrumentadas 3 pernas de estribos na direção leste oeste e 2 pernas de estribos na direção norte sul, sendo instalados 2 extensômetros diametralmente opostos em cada ponto. As leituras das deformações foram plotadas graficamente a cada passo de carga de 20% da carga última.

4.5.1 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE PUNÇÃO DA LAJE FS-1

A laje FS-1 é composta por armadura de punção com diâmetro de 8 milímetros, ancorada na armadura de flexão tracionada e comprimida. As Figuras 91 e 92 apresentam as deformações para as armaduras de punção.

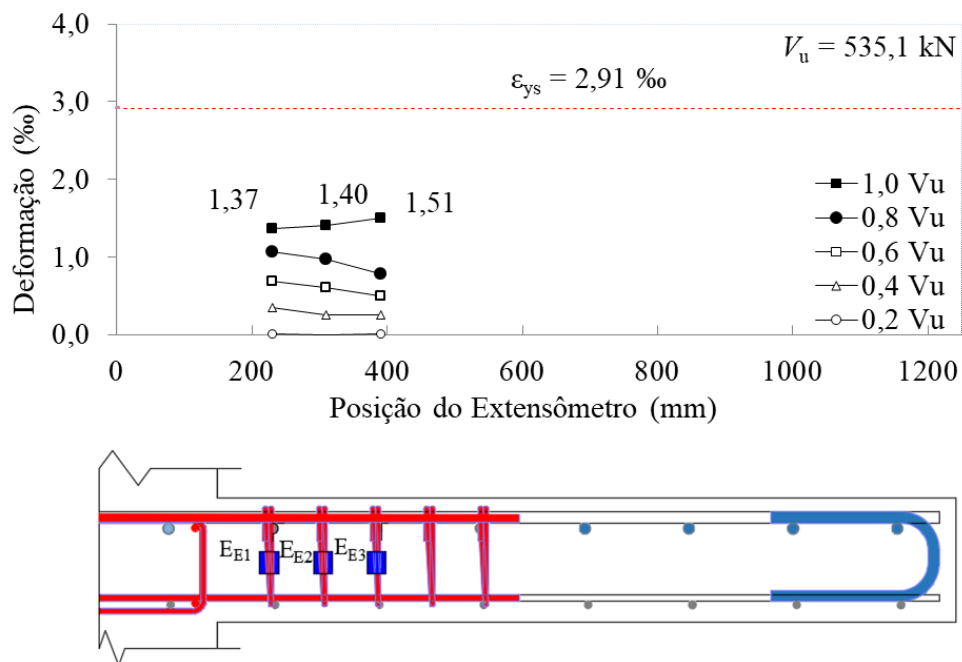


Figura 91 - Deformação dos extensômetros na direção leste oeste

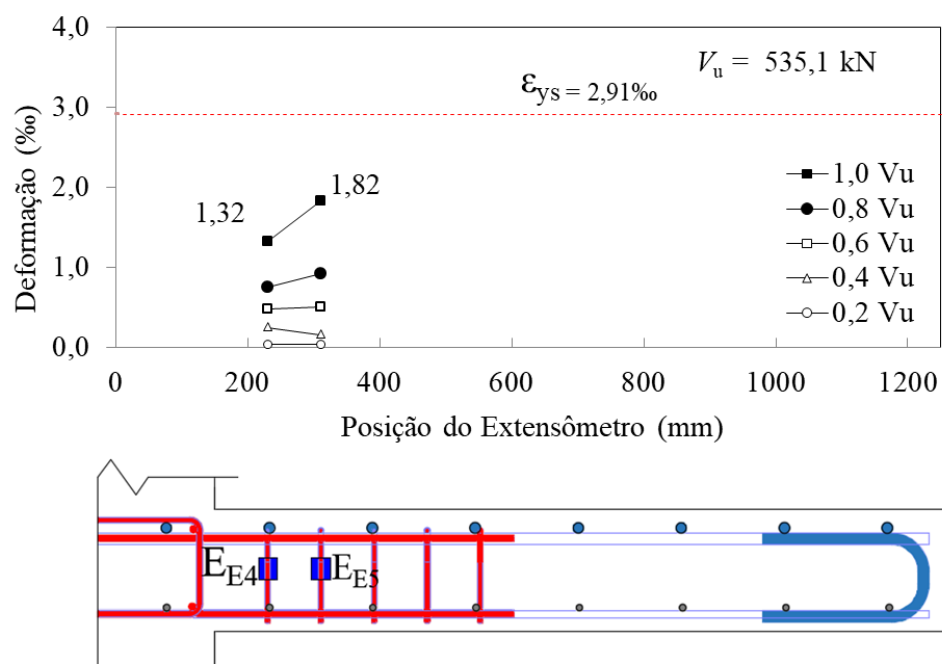


Figura 92 - Deformação dos extensômetros na direção norte sul

Na Figura 93 a seguir representamos as deformações dos extensômetros da laje FS-1

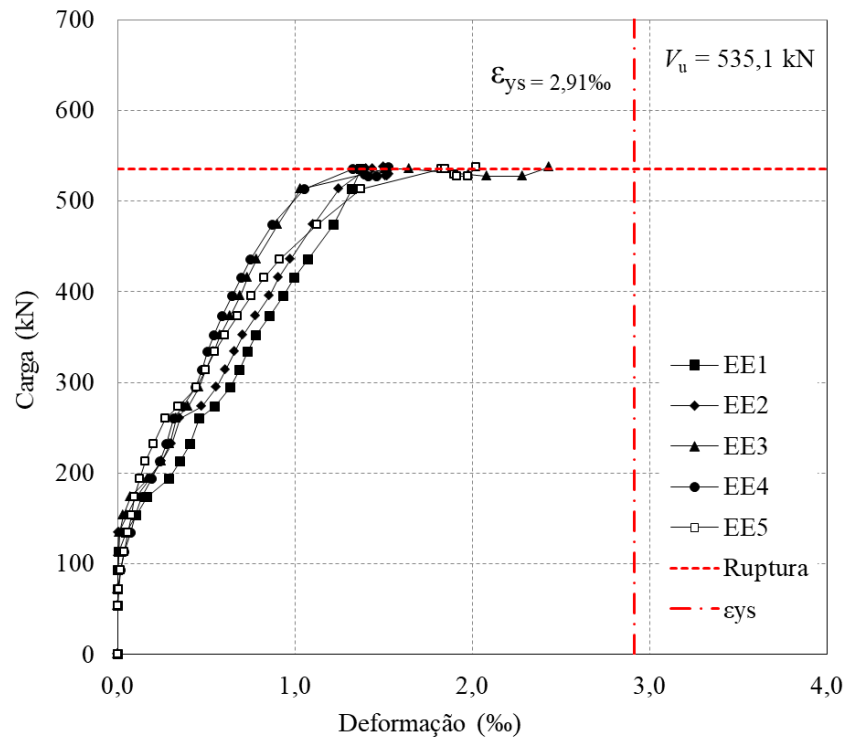


Figura 93 - Representação das deformações da armadura de punção

4.5.2 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE PUNÇÃO DA LAJE FS-2

A laje FS-2 é composta por armadura de punção com diâmetro de 8 milímetros, ancorada na armadura de flexão comprimida. Os gráficos de 94 a 96 apresentam as deformações para as armaduras de punção.

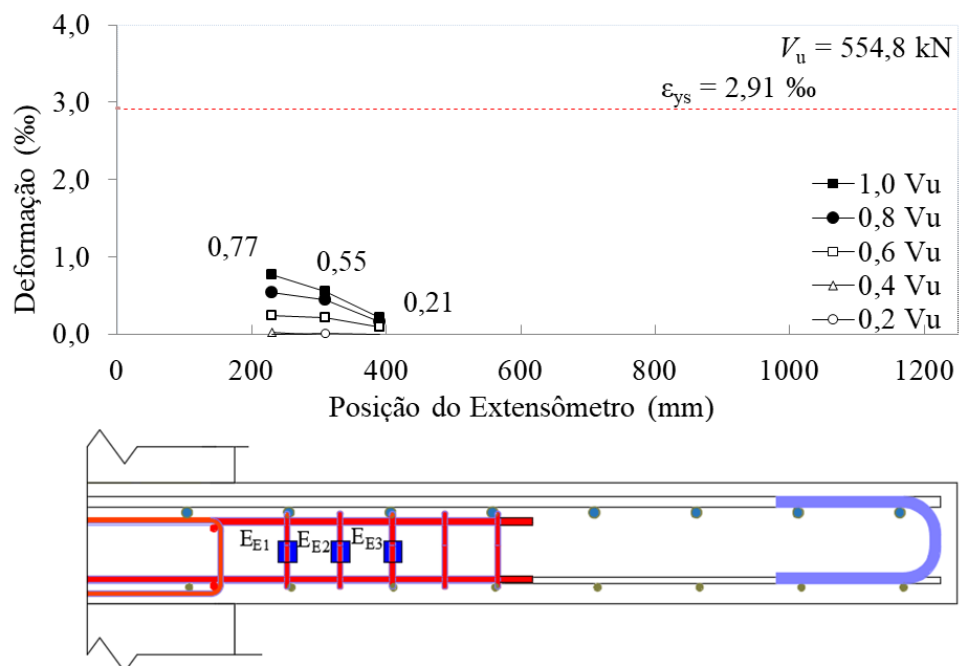


Figura 94 - Deformação dos extensômetros na direção leste oeste

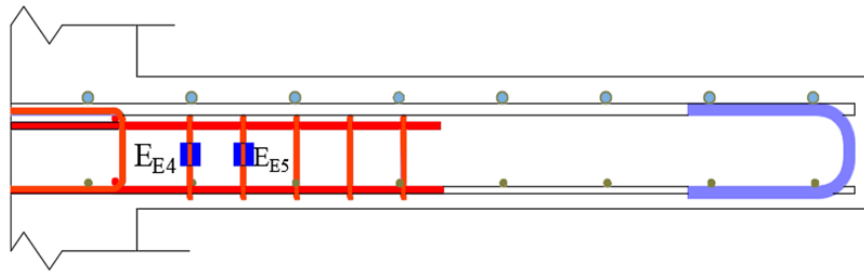
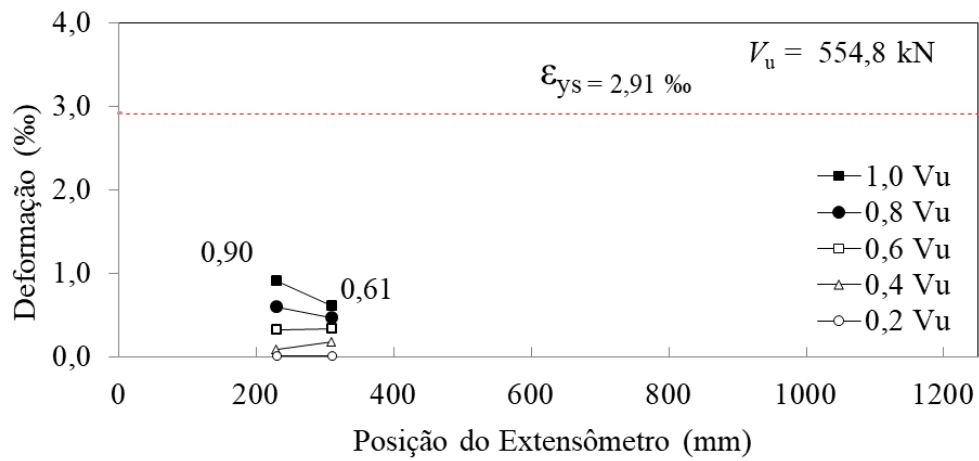


Figura 95 - Deformação dos extensômetros na direção norte sul

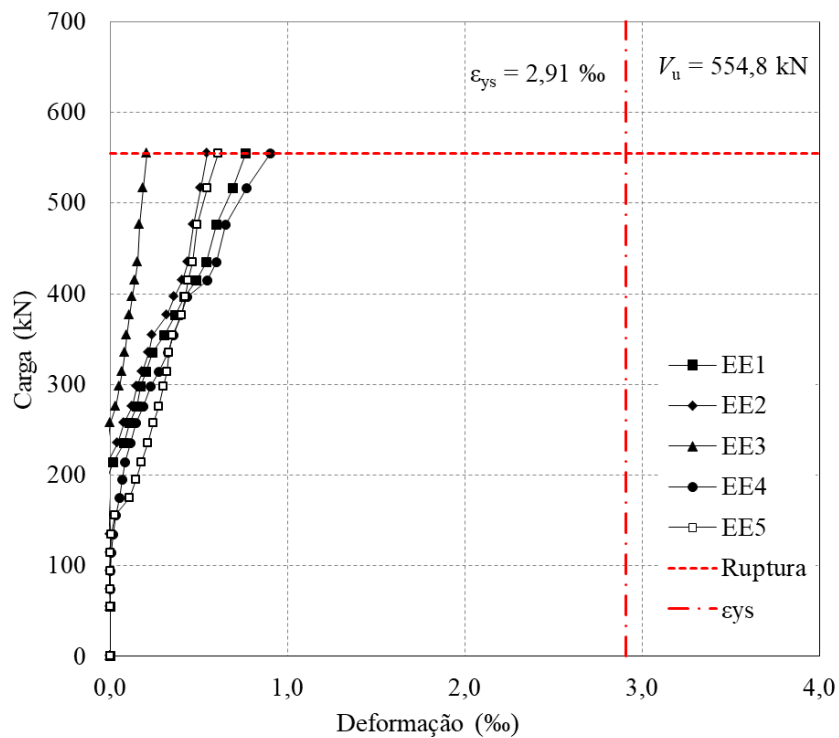


Figura 96 - Representação das deformações da armadura de punção

4.5.3 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE PUNÇÃO DA LAJE FS-3

A laje FS-3 é composta por armadura de punção com diâmetro de 8 milímetros, sem ancoragem. Os gráficos de 97 a 99 apresentam as deformações para as armaduras de punção.

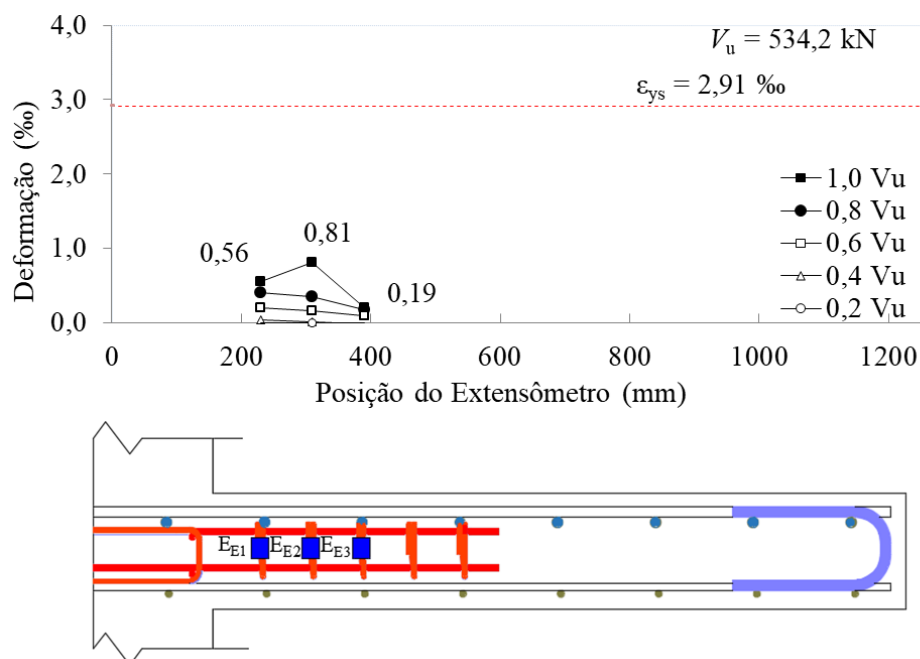


Figura 97 - Deformação dos extensômetros na direção leste oeste

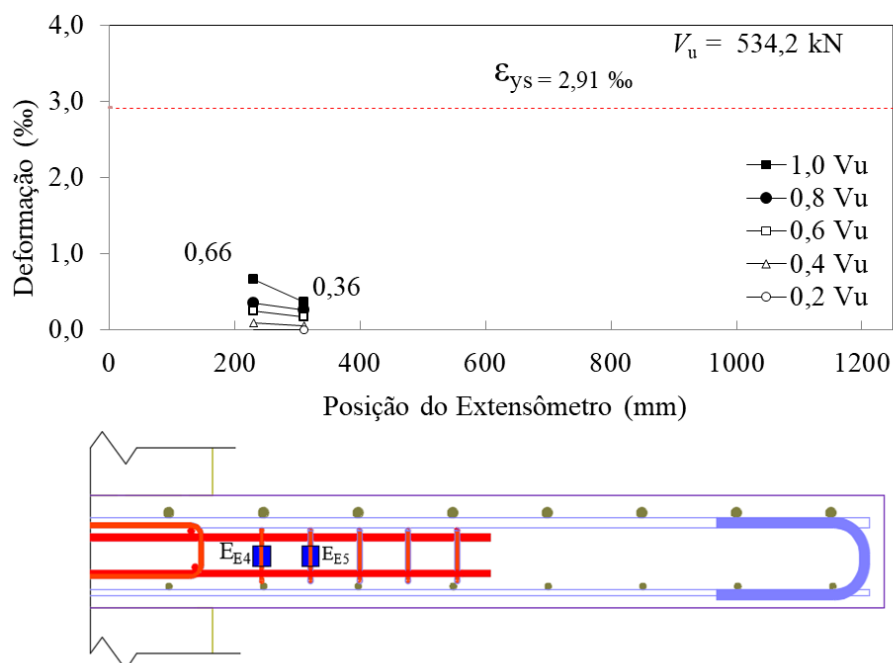


Figura 98 - Deformação dos extensômetros na direção norte sul

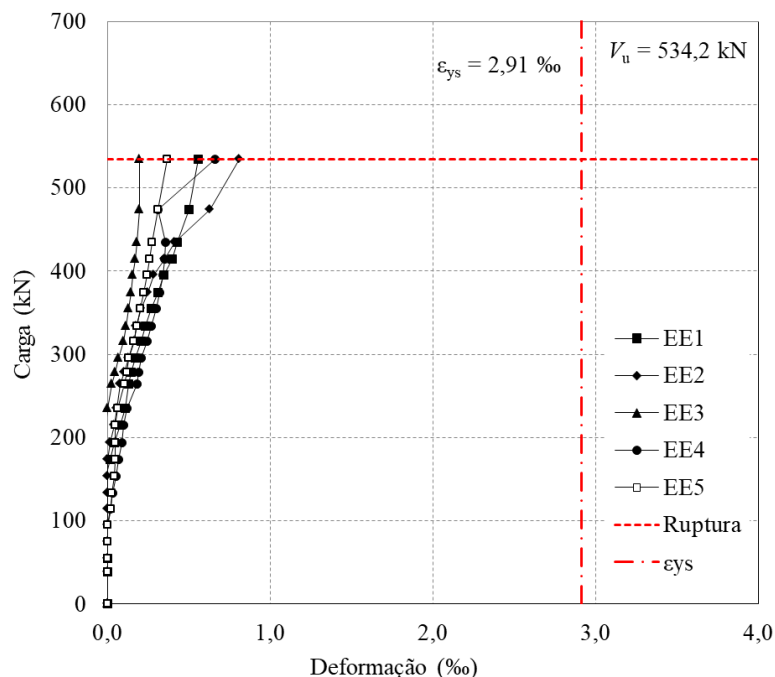


Figura 99- Representação das deformações da armadura de punção

Como podem ser verificados nos gráficos das deformações nas armaduras de punção, todos os valores ficaram na região elástica, sendo que a barra mais próxima do escoamento de 2,91‰ foi a EE5 na laje FS-1 com deformação de 1,82 ‰. Para as armaduras de punção foi obtido um módulo de elasticidade experimental de 186 GPa e sabendo que a tensão no aço tem uma relação direta com sua deformação, verificamos que na barra de maior deformação EE5 na laje FS-1 tivemos uma tensão aproximada de 338,52 MPa muito distante da tensão experimental que é de 542 MPa evidenciando uma pequena solicitação das armaduras de punção e justificando as limitações impostas pelas normas para as tensões f_{ywd} das armaduras de punção.

4.6 RESULTADO DOS MATERIAIS

4.6.1 Concreto

Na tabela a seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova de concreto.

Tabela 17 – Resultado médio de ensaio do concreto.

Tipo de Ensaio	Idade de rompimento (dias)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_c (GPa)
Compressão	65	29,9	-	-
Módulo de Elasticidade	65	-	-	27,8
Tração	70	-	2,4	-

4.6.2 Aço

Na tabela a seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova do aço.

Tabela 18 - Resultados de ensaio do aço

Diâmetro (mm)	f_{ys} (MPa)	E_c (GPa)	ε_{ys} (‰)
Ø 8,0	542	186	2,91
Ø 10,0	515	127	4,07
Ø 16,0	549	197	2,79

4.7 MAPAS DE FISSURAÇÃO

O mapa de fissuras foi realizado a partir do início do ensaio até cargas próximas à ruptura, sendo complementadas posteriormente ao ensaio. Para ser realizado foi disposta uma pessoa em um dos quadrantes da laje e marcando as fissuras e suas respectivas cargas no momento do seu surgimento na face superior da laje. Foi utilizada uma lâmpada para facilitar a visualização das fissuras e uma caneta. Nas Figuras 100 a 103 são apresentadas os mapas de fissuração e a disposição aproximada das armaduras de flexão e punção das lajes.

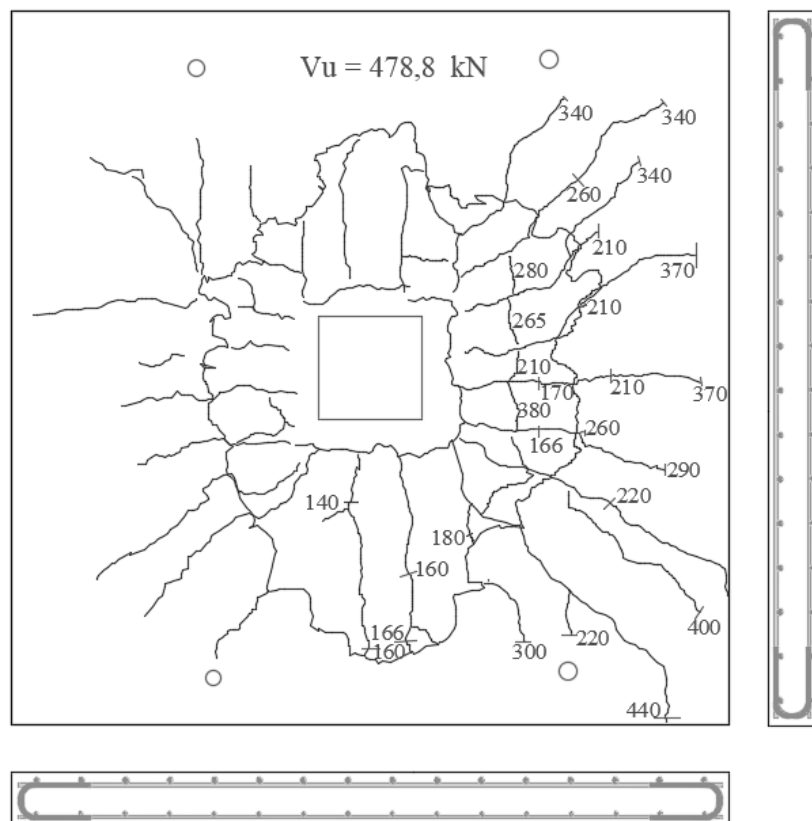


Figura 100 -a) Foto do mapa de fissuração da laje RSP de referência; b) Representação da laje RSP de referência.

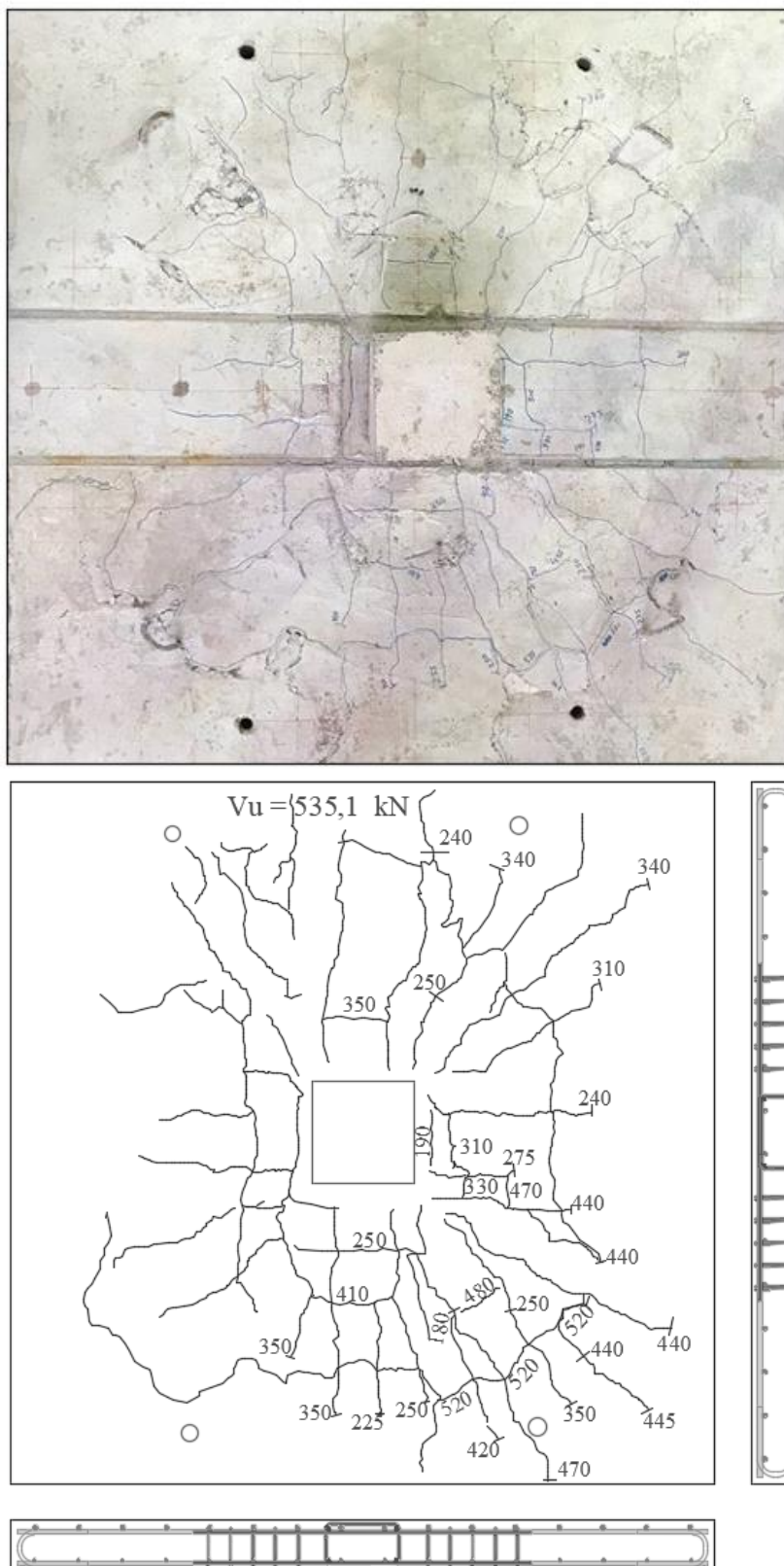


Figura 101 - Foto do mapa de fissuração da laje FS-1; b) Representação da laje FS-1.

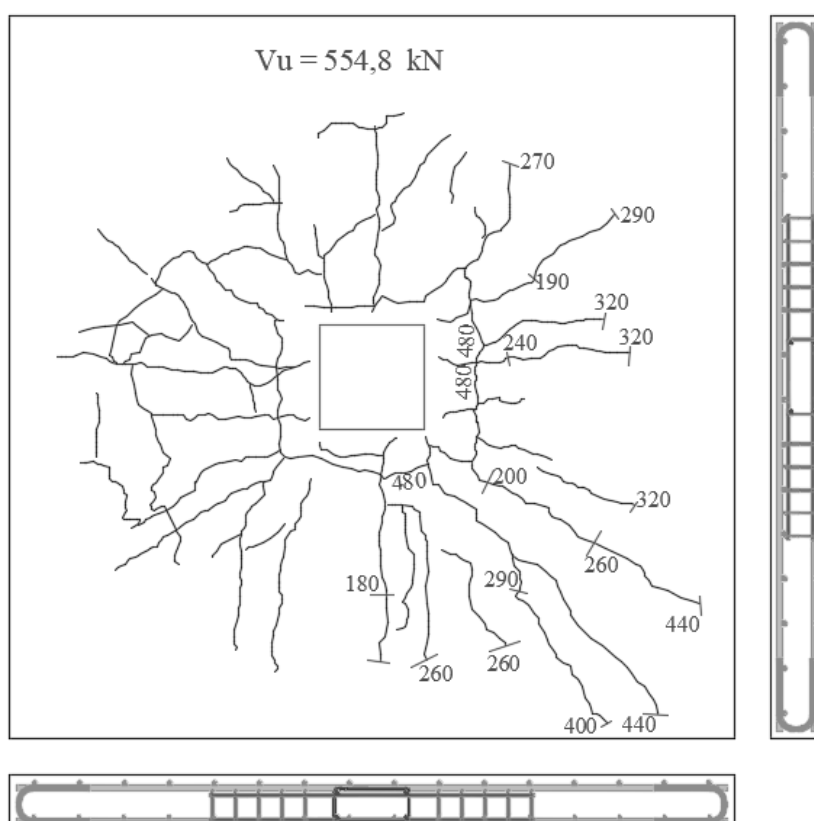


Figura 102 - Foto do mapa de fissuração da laje FS-2; b) Representação da laje FS-2

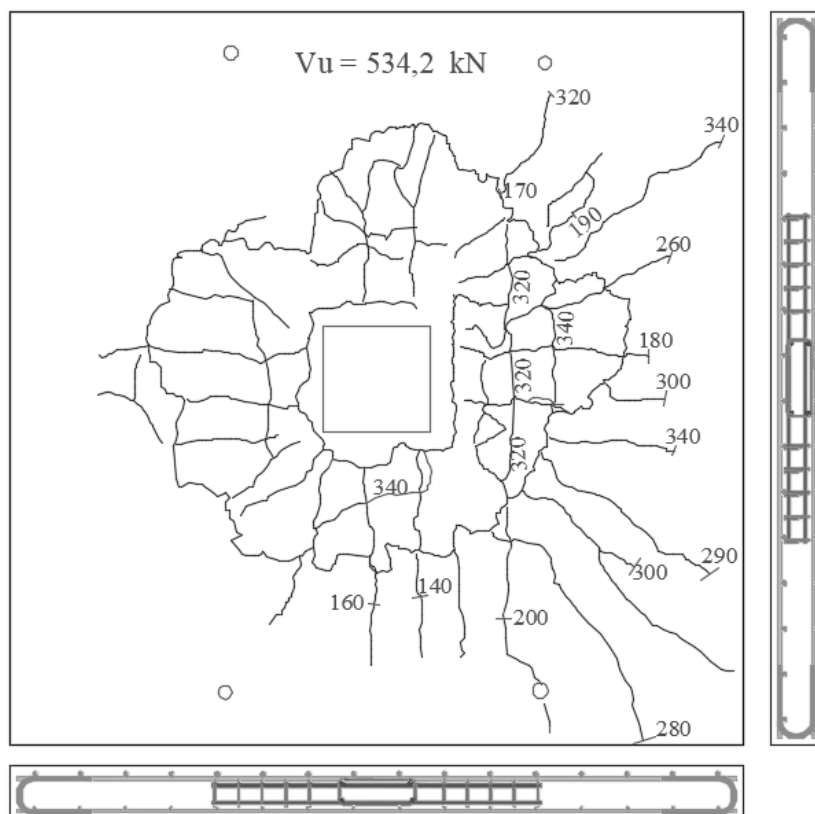


Figura 103 - Foto do mapa de fissuração da laje FS-3; b) Representação da laje FS--3.

Para análise do mapa de fissuração foi verificado primeiramente as fissuras nas lajes inerentes da retração do concreto e estas não sendo estudadas.

Com o início do experimento as primeiras fissuras observadas foram as radiais que iniciavam próximo a face do pilar e tinham sentido as bordas das lajes. Essas fissuras apareceram aproximadamente entre 25% e 30% da carga de ruptura.

Com o avanço do experimento verifica-se o surgimento de 2 fissuras tangenciais, sendo que a 1 surge entre 45% e 50% da carga de ruptura e a 2 tangencial surge em cerca de 75% e 80% da carga última, como pode ser verificado na laje FS-1.

Ao se analisar o mapa de fissuração, observa-se a borda da superfície de ruptura e ela sugere que as rupturas ocorreram fora da armadura de punção para a laje FS-1, sendo que para esta laje com armadura de punção totalmente ancorada o cone de punção teve um grande espraçamento ou pequeno ângulo de ruptura. Para as lajes RSP sem armadura de punção e laje FS-3 com armadura de punção sem ancoragem o espraçamento do cone de punção foi pequeno ou um grande ângulo de ruptura, sugerindo que a ancoragem aumenta a área de contribuição do concreto no combate a punção.

4.8 SUPERFÍCIE DE RUPTURA DAS LAJES

Para identificação da superfície de ruptura e suas inclinações, foram feitos cortes nas lajes. Devido à simetria de todo o sistema de armaduras e aplicação de carga foi escolhido um quadrante para realização do corte, neste caso foi escolhido o quadrante nordeste. Na figura 104 é apresentada a posição dos cortes para cada uma das lajes.

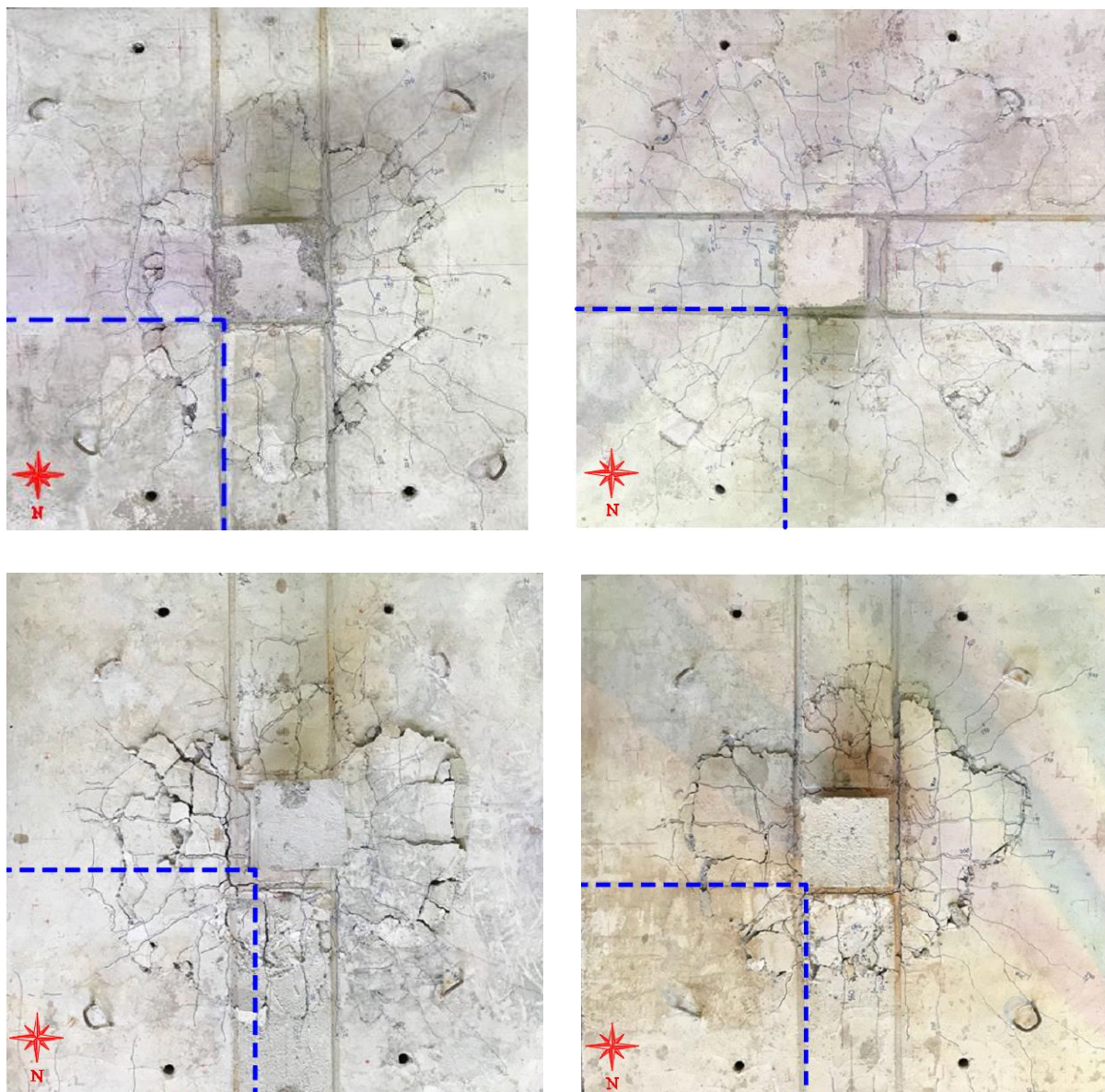


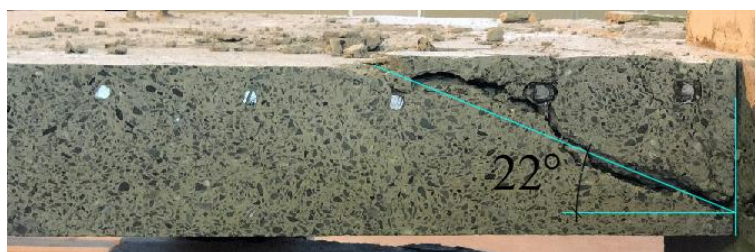
Figura 104 - Representação dos cortes das lajes; a) Laje RSP de referência; b) Laje FS-1; c) Laje FS-2; d) Laje FS-3.

Com esses cortes foi possível verificar a inclinação da superfície de ruptura com precisão, que se estende da parte comprimida à parte tracionada das lajes formando um tronco de cone. Em todas as lajes as inclinações das superfícies de ruptura tiveram variações ao longo da altura da laje, principalmente nos encontros com as armaduras de punção e de flexão, tendo algumas

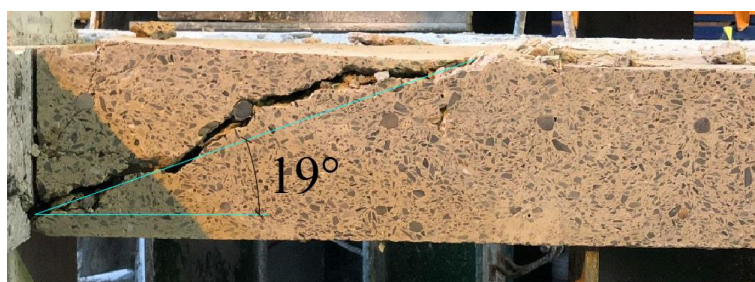
delaminações, que são rupturas ocorridas no cobrimento das armaduras, em alguns casos. As figuras 105 a 108 representam as inclinações das superfícies de ruptura das lajes RSP, FS-1, FS-2 e FS-3 respectivamente.



a)



b)



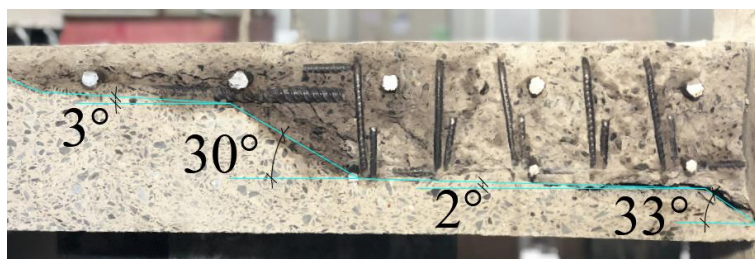
c)

Figura 105 - Inclinação da superfície de ruptura da laje RSP; b) Inclinação da superfície de ruptura do corte leste; c) Inclinação da superfície de ruptura do corte norte.

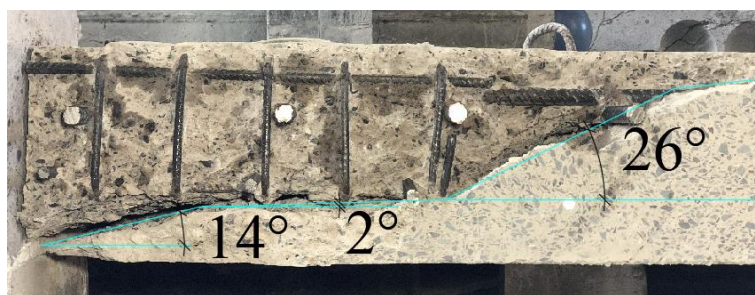
Na laje RSP a superfície de ruptura é bem uniforme, mantendo uma inclinação aproximadamente constante, que se inicia na face do pilar e se estende até a parte superior da laje.



a)



b)



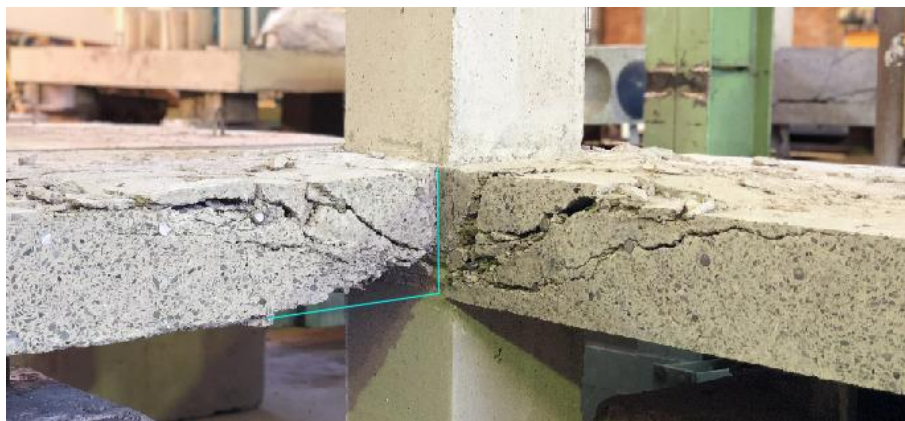
c)

Figura 106 - a) Inclinação da superfície de ruptura da laje FS-1; b) Inclinação da superfície de ruptura do corte leste; c) Inclinação da superfície de ruptura do corte norte.

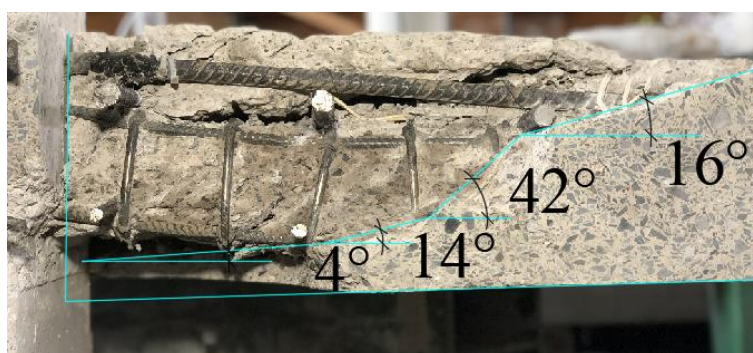
Na laje FS-1 com armadura de punção ancorada na armadura de flexão tracionada e comprimida tivemos as inclinações da superfície de ruptura passando fora das armaduras de punção como podem ser observadas na figura 106.

Na figura 106b (lado leste) a superfície de ruptura começa com uma inclinação de 33° da superfície do pilar até o encontro da armadura de punção, sendo esta uma característica de ruptura por punção sem armadura de cisalhamento. A partir da armadura de punção há uma delaminação que se estende até a última camada. Na última camada da armadura de punção, a inclinação da superfície de ruptura (que se caracteriza como principal) adquire uma inclinação de 30° que se estende até a armadura de flexão tracionada, sendo a partir deste ponto tendo uma inclinação de aproximadamente 3° até a parte superior da laje.

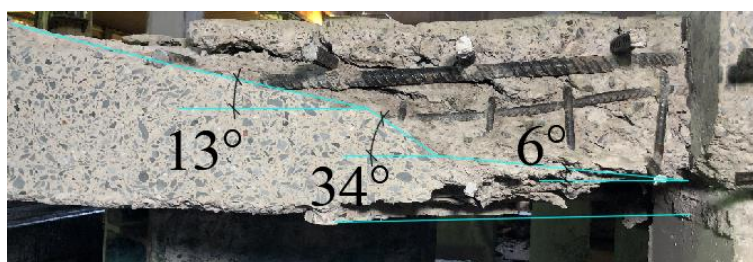
No corte relativo ao lado norte as características são as mesmas do lado leste, tendo somente uma variação quanto ao valor do ângulo, sendo considerado o ângulo principal 26° .



a)



b)



c)

Figura 107 - a) Inclinação da superfície de ruptura da laje FS-2; b) Inclinação da superfície de ruptura do corte norte; c) Inclinação da superfície de ruptura do corte leste.

Na laje FS-2 com armadura de punção ancorada na armadura de flexão comprimida tivemos as inclinações das superfícies de ruptura passando por dentro das armaduras de punção como podem ser observados na figura 107.

No corte norte (figura 107b), verifica-se uma delaminação que se estende da face do pilar ate a terceira camada da armadura de punção, com ângulo aproximado de 4° . A partir da terceira camada há uma intensificação da inclinação passando para 14° e atingindo a última camada com inclinação de 42° (considerada como principal).

No corte leste (figura 107c) a inclinação da superfície de ruptura atinge a primeira camada da armadura de punção com um ângulo de 6° e se estende ate a terceira camada. Na quarta

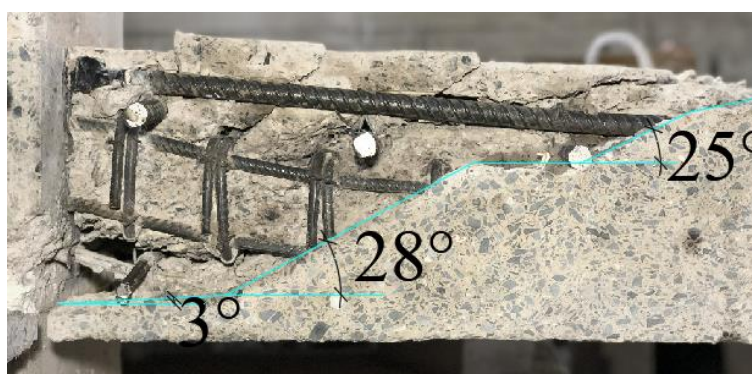
camada a inclinação passa para 34° (considerada como principal) atingindo a parte superior da armadura de punção, passando para uma inclinação de 13° que se estende ate a parte superior da laje.



a)



b)



c)

Figura 108 - a) Inclinação da superfície de ruptura da laje FS-3; b) Inclinação da superfície de ruptura do corte leste; c) Inclinação da superfície de ruptura do corte norte.

Para a laje FS-3, com armadura de punção sem ancoragem na armadura de flexão as inclinações das superfícies de ruptura passaram pelas armaduras de punção como podem ser observadas na figura 108.

No corte leste (figura 108b) há uma delaminação que se estende ate um pouco antes da terceira camada. Chegando um pouco antes da terceira camada a inclinação da superfície de ruptura atinge 29° (considerada como principal), se estendendo ate a quarta camada. Após a

quarta camada a superfície de ruptura atinge a parte superior da laje com uma inclinação de 16° .

No corte norte (figura 108c) têm-se as mesmas características do corte leste (figura 108b), mudando somente os valores dos ângulos, sendo a inclinação principal o ângulo de 28° .

Na tabela 19 temos uma representação dos ângulos das superfícies de rupturas principais relativos aos cortes das lajes e uma média aritmética para ter um ângulo para a superfície de ruptura.

Tabela 19 - Inclinação da superfície de ruptura das lajes.

Lajes	Inclinação da Superfície de Ruptura	Inclinação		Média
		Lado Leste	Lado Norte	
RSP	-	$22,0^\circ$	$19,0^\circ$	$20,5^\circ$
FS-1	F.A.P.	$30,0^\circ$	$26,0^\circ$	$28,0^\circ$
FS-2	D.A.P.	$34,0^\circ$	$28,0^\circ$	$31,0^\circ$
FS-3	D.A.P.	$29,0^\circ$	$28,0^\circ$	$28,5^\circ$

F.A. P = Fora da Armadura de Punção.

D.A.P. = Dentro da Armadura de Punção.

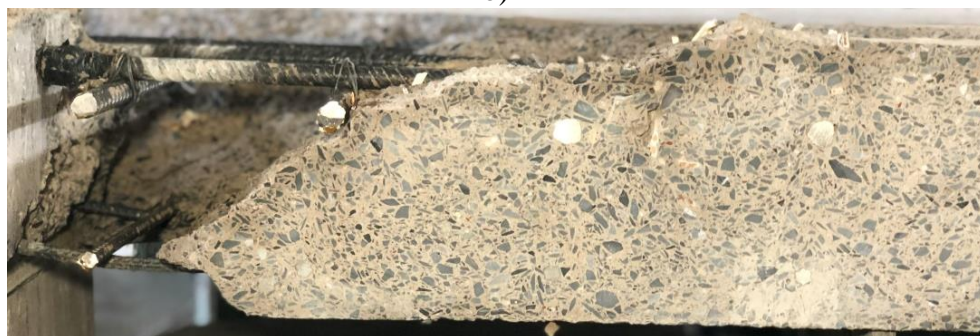
Foi retirado o cone de punção das lajes, com o auxílio de uma marreta e um formão, a fim de verificar possíveis rompimentos das armaduras de flexão e punção tendo assim uma melhor análise do comportamento das lajes. Nas figuras 109 a 112 estão representadas as superfícies de ruptura das lajes.



a)



b)



c)

Figura 109 - a) Superfície de ruptura da laje RSP; b) Corte e superfície de ruptura da face leste; c) Corte e superfície de ruptura da face norte.



a)



b)



c)

Figura 110 - a) Superfície de ruptura da laje FS-1; b) Corte e superfície de ruptura da face leste; c) Corte e superfície de ruptura da face norte.



a)



b)



c)

Figura 111 - a) Superfície de ruptura da laje FS-2; b) Corte e superfície de ruptura do lado norte; c) Corte e superfície de ruptura do lado leste.



a)



b)



c)

Figura 112 - a) Superfície de ruptura da laje FS-3; b) Corte e superfície de ruptura do lado leste; c) Corte e superfície de ruptura do lado norte.

Com a retirada dos cones de punção foi verificado que não houve rompimentos das armaduras de punção e de flexão, sendo então as rupturas ocorridas pelo concreto caracterizadas como frágeis, uma característica de ruptura por punção.

Nas figuras 113 a 116 foi feito uma representação 3D das lajes, mostrando a superfície de ruptura e sua interseção com as armaduras de flexão e punção, sendo também representados os cones de punção das lajes.

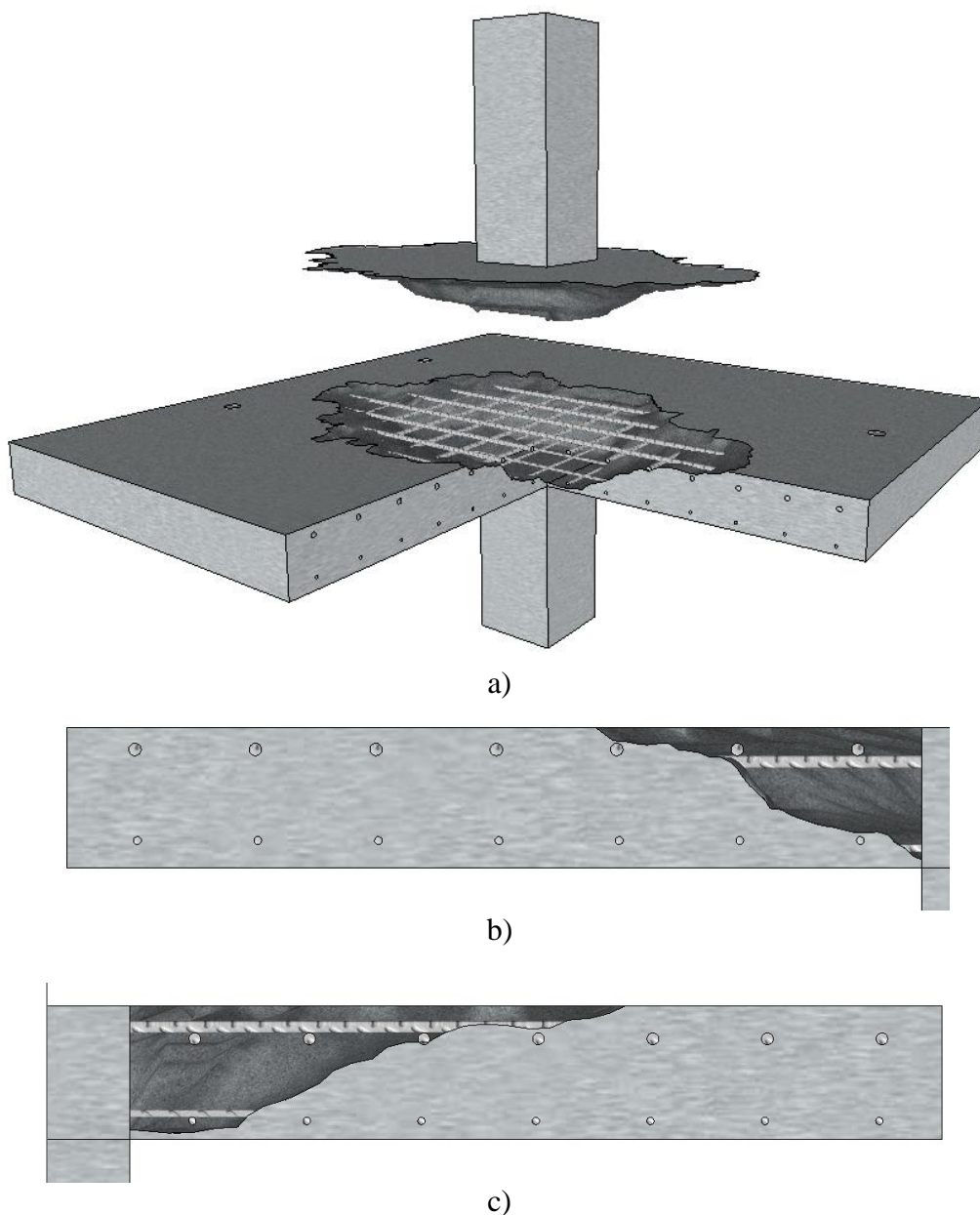
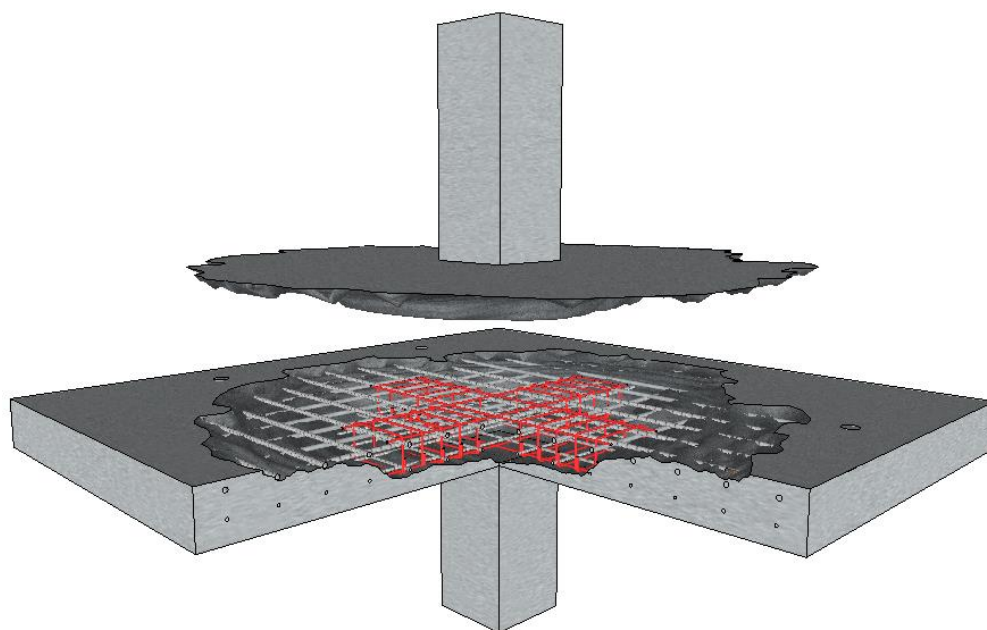
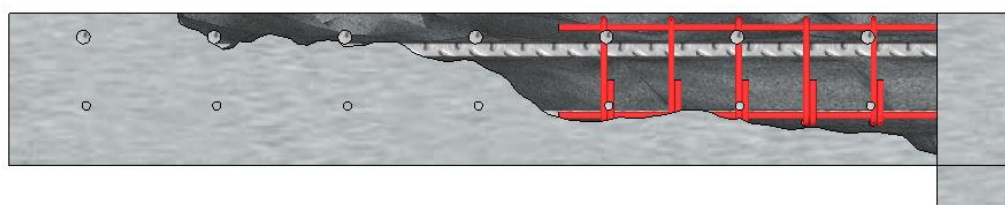


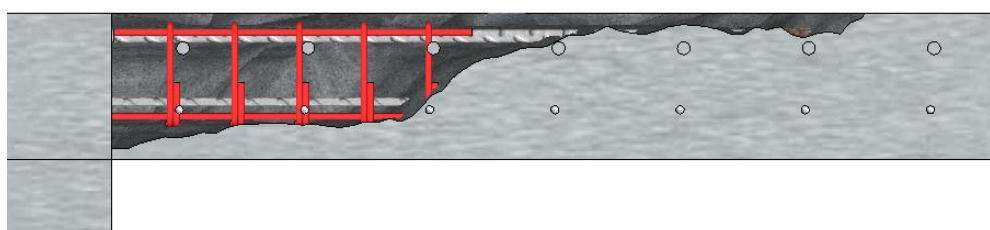
Figura 113 - a) Representação da superfície de ruptura e do cone de punção da laje RSP; b) Corte e superfície de ruptura da face leste; c) Corte e superfície de ruptura da face norte.



a)



b)



c)

Figura 114 - Superfície de ruptura e cone de punção da laje FS-1; b) Corte e superfície de ruptura do lado leste; c) Corte e superfície de ruptura do lado norte.

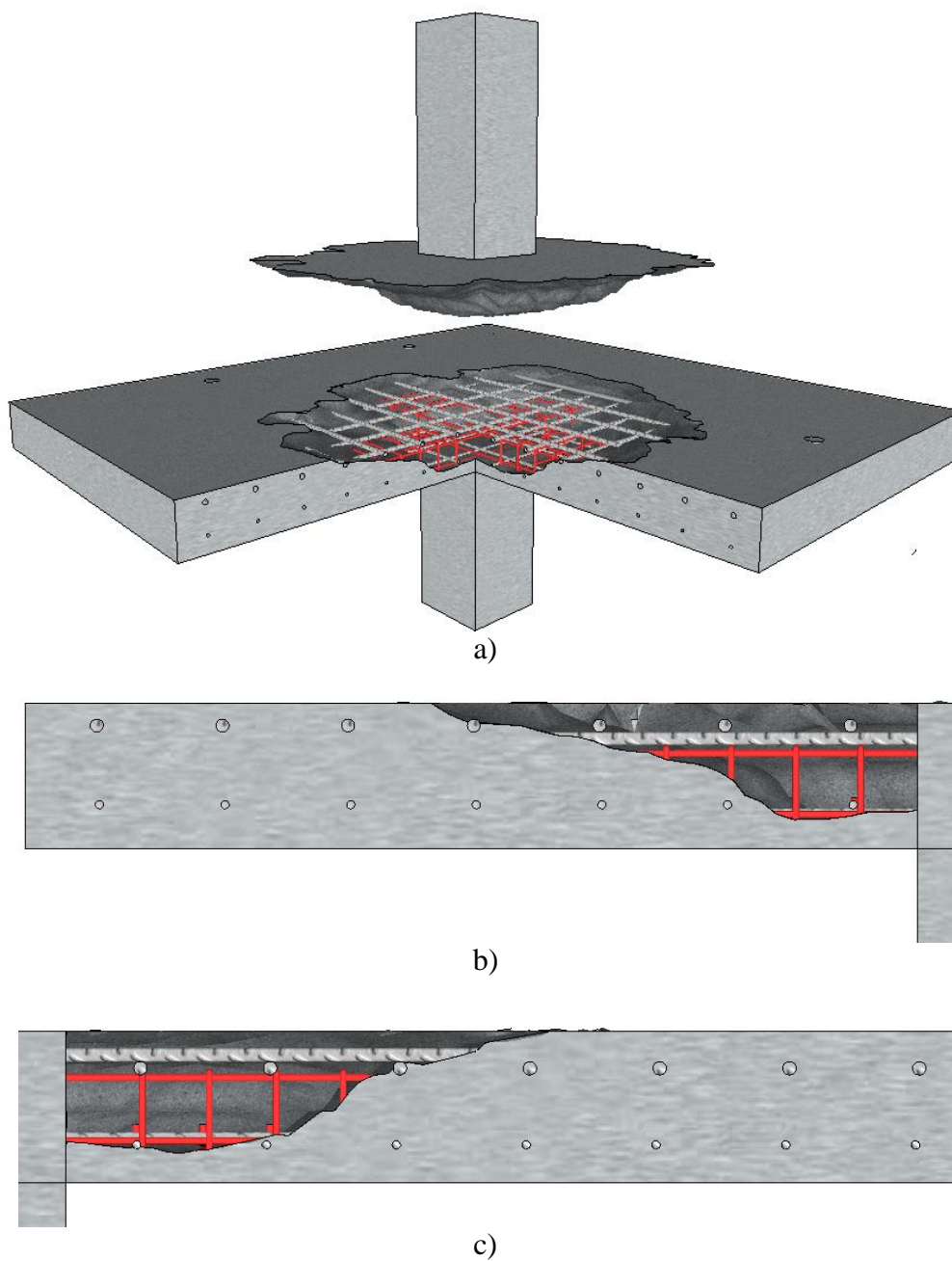


Figura 115 - Superfície de ruptura e cone de punção da laje FS-2; b) Corte e superfície de ruptura do lado leste; c) Corte e superfície de ruptura do lado norte.

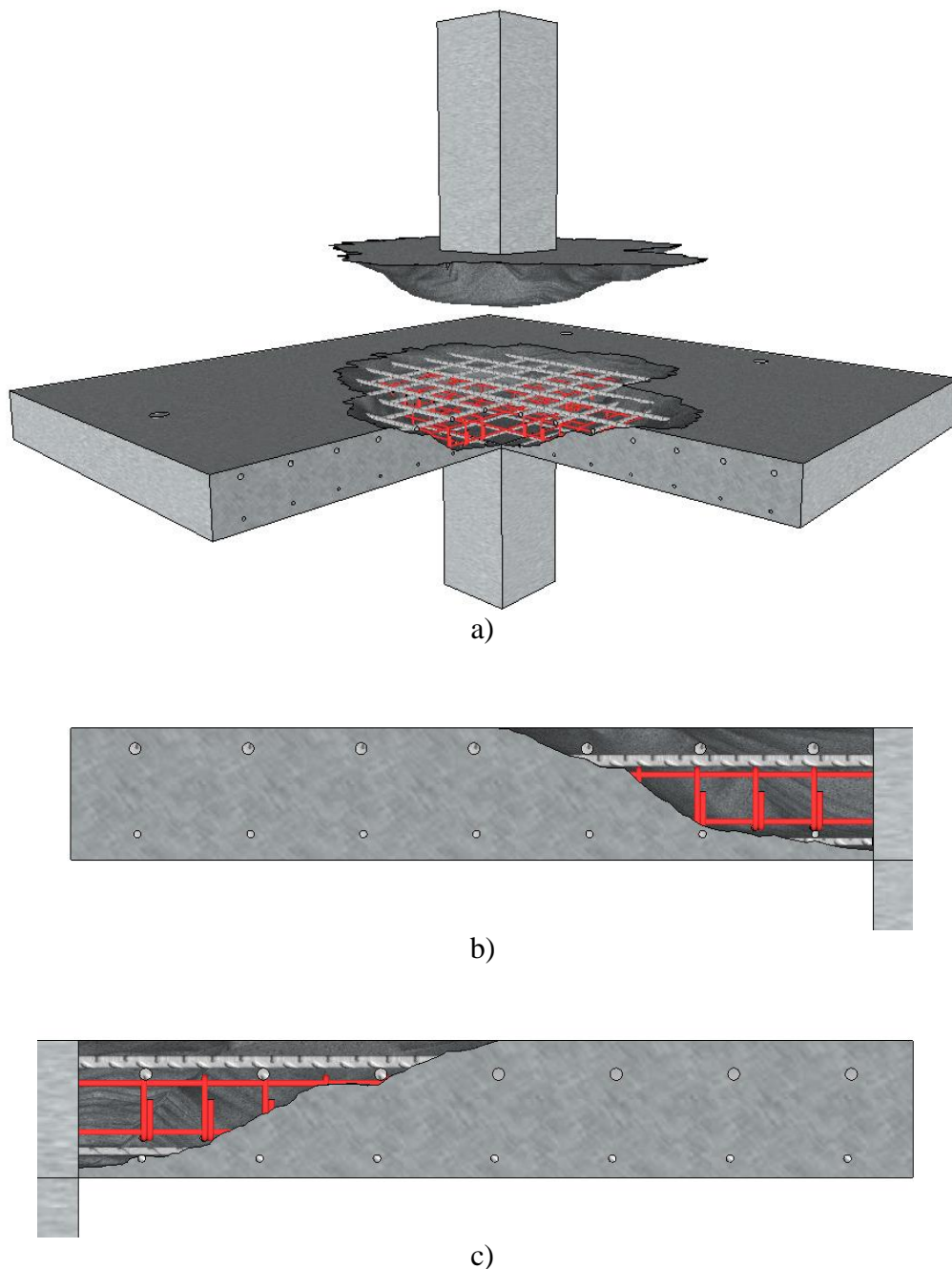


Figura 116 - Superfície de ruptura e cone de punção da laje FS-3; b) Corte e superfície de ruptura do lado leste; c) Corte e superfície de ruptura do lado norte.

4.9 MODO DE RUPTURA

Foi feito uma análise para classificação do modo de ruptura das lajes, verificando se estas romperam por flexão, punção ou uma ruptura mista. Os parâmetros estudados para classificação do modo de ruptura foram: Deformações nas armaduras de flexão e punção obtidos dos extensômetros fixados nestas barras, com objetivo de verificar se estas barras sofreram escoamento; deformações tangenciais e radiais obtidos das deformações do concreto através de extensômetros fixados na parte inferior da laje, com o objetivo de verifica se houve

esmagamento do concreto; análise visual das armaduras de flexão e punção que foi obtido através da retirada do cone de punção das lajes, no intuito de verificar se houve rompimento de alguma barra; comportamento da superfície de ruptura das lajes, comportamento do mapa de fissuração e comparação da carga última experimental com a carga resistente a flexão (V_{Flex}). Na figura 117 a seguir temos uma visualização do cone de punção das lajes e em seguida a tabela 20 apresenta os dados experimentais utilizados para classificação do modo de ruptura das lajes.

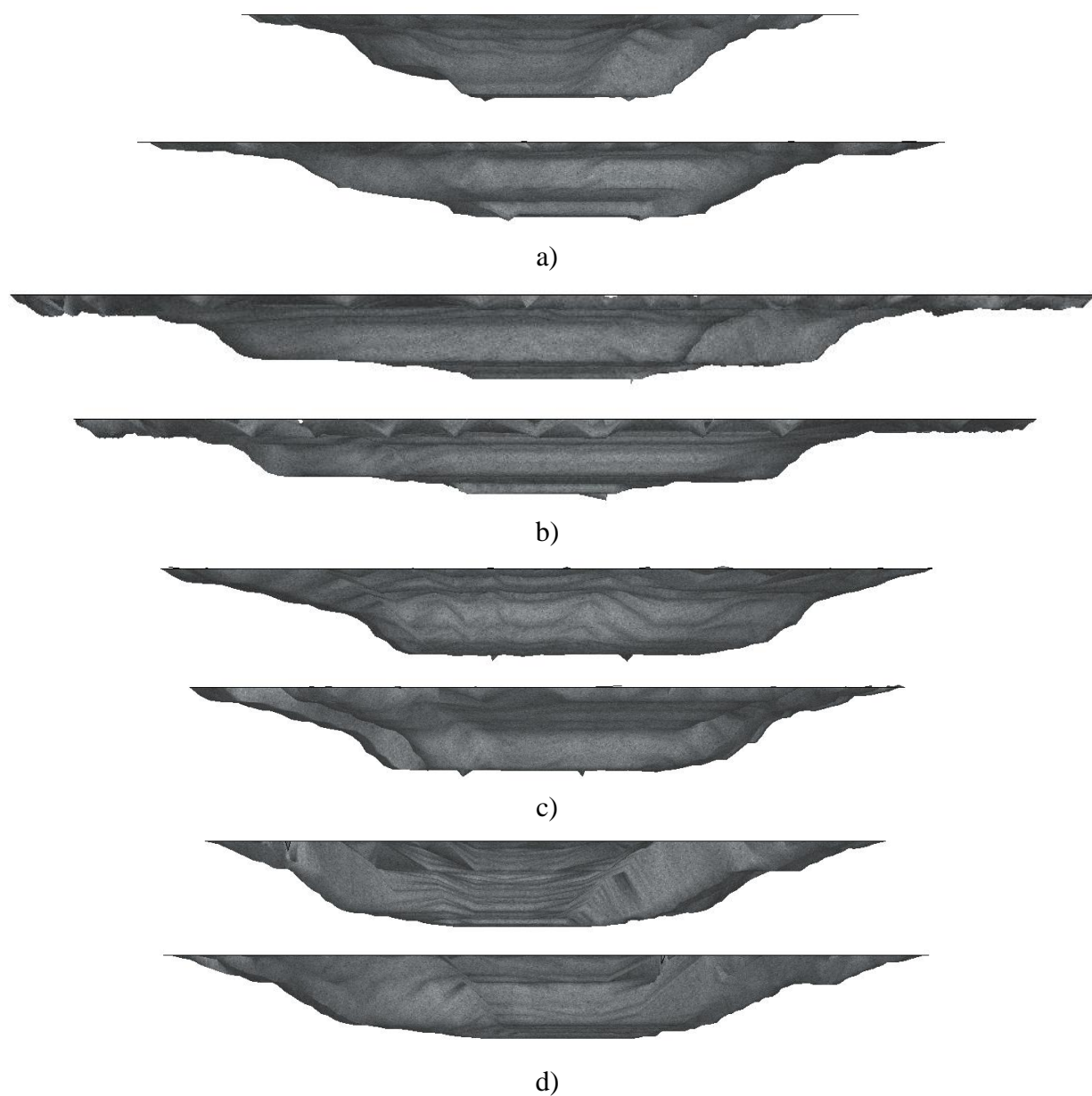


Figura 117 - Vistas a 90 graus dos cones de punção; a) Laje RSP de referência; b) Laje FS-1; c) laje FS-2; d) Laje FS-3.

Tabela 20 - Classificação dos modos de ruptura das lajes.

Lajes	Deformações (‰)									Vu (kN)	V _{flex} (kN)
	Armadura de flexão							Concreto			
	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	Tang	Radial		
RSP	2,93	2,75	2,34	1,47	1,89	2,22	1,94	-1,24	-0,52	478,8	834,50
FS-1	2,75	2,10	2,97	2,15	2,59	2,35	2,02	-1,72	-1,18	535,1	829,57
FS-2	2,92	3,03	2,70	1,62	2,53	2,40	2,08	-1,09	-0,54	554,8	835,73
FS-3	2,78	2,75	2,49	1,86	2,55	2,49	2,33	-2,11	-0,75	534,2	835,12
Diâmetro (mm)		ε _{ys} (‰)									
Ø 16,0		2,79									

Tabela 20 - continuação

Tabela 20 - Continuação							
Lajes	Deformações (%)					Superfície de Ruptura	Modo de Ruptura
	Armaduras de punção						
	EE1	EE2	EE3	EE4	EE5		
RSP	-	-	-	-	-	-	Punção
FS-1	1,37	1,40	1,51	1,35	1,82	F.A.P.	Punção
FS-2	0,77	0,55	0,21	0,90	0,61	D.A.P.	Punção
FS-3	0,56	0,81	0,19	0,66	0,36	D.A.P.	Punção
Diâmetro (mm)		ε_{ys} (‰)		F.A.P. = Fora da Armadura de punção.			
Ø 8,0		2,91		D.A.P. = Fora da Armadura de punção.			

Verifica se um bom comportamento quanto às deformações das armaduras de flexão, chegando ao limite de escoamento somente uma barra de flexão da laje RSP, uma barra de flexão da laje FS-1 e duas barras de flexão da laje FS-2. Essas barras chegaram a escoar, mas ficaram muito próximo ao limite de escoamento, sendo as demais barras permanecendo no regime elástico.

Para as deformações do concreto verifica se que o concreto da laje FS-3 atingiu o limite de plastificação correspondente a 2,0 ‰, mas não chegou ao limite de esmagamento correspondente a 3,5 ‰. Sendo as demais lajes permanecendo no regime elástico.

Na comparação da carga última com a carga resistente a flexão verifica-se que um valor maior desta comparada com aquela sendo de aproximadamente: 48,64%, 32,21%, 28,47% e 33,32% para as lajes RSP, FS-1, FS-2 e FS-3 respectivamente.

Analisando as superfícies de rupturas e as vistas dos cones apresentados na figura 114 verifica-se que as rupturas são características de rompimentos por punção, caracterizados pelos troncos de cone apresentados e as inclinações das superfícies de rupturas mostradas na tabela 20.

Analisando as armaduras de punção verifica-se que não houve nenhuma armadura atingindo o patamar de escoamento, sendo então que não houve uma solicitação assídua dessas armaduras sendo o concreto muito solicitado até a ruptura, caracterizando assim uma ruptura frágil sem prévios avisos, uma característica de ruptura por punção.

Partindo dessas análises todas as formas de rupturas foram caracterizadas como punção pura, sendo que algumas barras de flexão atingiram o escoamento, mas essas não chegaram a grandes deformações e nem romperam.

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi estudado o comportamento a punção de lajes lisas de concreto armado, com pilar interno quadrado submetido a carregamento simétrico. A pesquisa foi realizada em 4 lajes lisas sendo a primeira laje somente com armadura de flexão, e as demais lajes com armadura de punção variando a ancoragem da armadura de punção na armadura de flexão.

Verificando os resultados experimentais e tendo a laje RSP como referência, verificamos um aumento de carga de 11,76%; 15,87%; 11,57% respectivamente para as lajes FS-1, FS-2 e FS-3, evidenciando a importância da utilização da armadura de cisalhamento para combate a ruptura por punção.

Tendo a laje FS-1 (com armadura de punção totalmente ancorada na armadura de flexão) como referência, verificamos um aumento de carga de 3,68% se comparada com a laje FS-2 (com armadura de punção ancorada somente na armadura de flexão comprimida) e praticamente a mesma carga se comparada com a laje FS-3 (com armadura de punção sem ancoragem). Evidenciando que a utilização da armadura de punção sem ancoragem ou parcialmente ancorada pode ser utilizada para fins de projeto, sendo que esta forma de montagem é consideravelmente mais fácil e rápida, diminuindo o tempo de execução de uma construção. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados pelos pesquisadores *Caldentey et. al.* (2013), que chegaram a conclusões semelhantes em sua pesquisa, sendo ainda evidenciada pelos autores que a utilização da armadura de punção sem ancoragem é uma prática comum em muitos países, inclusive na Espanha.

Verificando os resultados experimentais com os resultados teóricos normativos verifica-se que o ACI acertou os resultados de carga última das lajes RSP e FS-3 e ficou com uma carga menor para as lajes FS-1 e FS-2 em aproximadamente 5 kN e 20 kN respectivamente, evidenciando que a norma se aplicou muito bem para as lajes em questão. Para os códigos Eurocode 2 (2004) e ABNT NBR 6118 (2014) verifica-se valores acima dos valores experimentais. Os valores obtidos com o Eurocode 2 (2004) foi superior aos valores experimentais de 2,52%; 11,00%; 7,86%; 11,94% para as lajes RSP, FS-1, FS-2 e FS-3, respectivamente. Pela ABNT NBR 6118 (2014) os valores obtidos foram superiores aos valores experimentais de 12,10%; 36,69%; 32,62 e 37,66% para as RSP, FS-1, FS-2 e FS-3 respectivamente. Esses resultados também corroboram com a pesquisa realizada pelos pesquisadores *Caldentey et. al.* (2013), que chegaram a conclusões semelhantes relacionados aos códigos normativos: sendo mencionado o conservadorismo do código ACI e os demais códigos menos conservadores.

Verifica-se um aumento gradativo dos deslocamentos verticais para as lajes FS-3, FS-2 e FS-1 respectivamente, em decorrência do emprego da armadura de punção e das diferentes formas de ancoragem utilizadas, garantindo também um aumento gradativo da ductilidade das respectivas lajes. Ou seja, para a laje FS-1 com ancoragem total, houve maiores deslocamentos.

A partir dos cortes das lajes e retirada dos cones de punção foi possível verificar algumas inclinações na superfície de ruptura das lajes, sendo as inclinações que cortam as armaduras de punção tendo um valor médio de $31,0^\circ$ e $28,5^\circ$ para as lajes FS-2 e FS-3. A laje FS-1 sofreu delaminação e ruptura fora das armaduras de punção com inclinação média de $28,0^\circ$. Todas as prescrições normativas consideram as lajes bem ancoradas, atribuíram rupturas fora das armaduras de punção, o que de fato ocorreu na laje FS-1.

Para as armaduras de punção verifica-se uma diminuição de deformações se comparadas à laje FS-1 com ancoragem total, em relação às lajes FS-2 e FS-3, com ancoragem parcial e sem ancoragem, respectivamente.

Os padrões de fissuras ocorreram de forma semelhante entre as lajes, surgindo primeiramente às fissuras radiais e posteriormente as tangenciais, aumentando até a ruptura das lajes.

Diante de todos os resultados analisados nesta pesquisa verifica-se que a ancoragem da armadura de punção não apresenta acréscimos significativos de carga se comparadas às cargas das lajes ensaiadas, evidenciando que a utilização da armadura de punção pode ser aplicada ao mercado da construção civil sem necessidade de ancoragem. A aplicação de armadura de punção sem ancoragem aperfeiçoa de forma significativa a execução do sistema de lajes lisas utilizando este tipo de armadura. Verifica-se também que a ancoragem da armadura de punção traz uma maior solicitação aos estribos, mas estes atingem pequenas deformações que não representam riscos de escoamento ou ruptura dos mesmos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que seja feito mais experimentos em lajes lisas, estudando a punção, tendo como parâmetros de estudo a utilização de outras formas de ancoragem, aumentando o banco de dados relativos ao tema tendo assim análises mais conclusivas sobre diversas formas de ancoragem de armaduras de punção.

Recomenda-se que sejam propostos modelos para as normas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2018) e EUROCODE 2 (2004), para a utilização da armadura de punção parcialmente ancorada e sem ancoragem. Sendo essas propostas adaptadas a partir dos modelos teóricos normativos vigentes e dos resultados experimentais obtidos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318M-14 – *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary*. Farmington Hills, EUA, 2014.

BARTOLAC, M.; DAMJANOVIC, D.; DUVNJAK, I. Punching strength of flat slabs with and without shear reinforcement. 2015. 17p.

BROMS, C. E., Concrete Flat Slabs and Footings: Design Method for Punching and Detailing for Ductility. PhD Thesis. Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Structural Design and Bridges, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2005, 114 pp

CALDENTEY, A. P.; LAVASELLI, P. P.; PEIRETTI, H. C.; FERNÁNDEZ, F. A. *Influence of stirrup detailing on punching shear strength of flat slabs*. Structural Concrete Research Group, School of Civil Engineering, Polytechnic University of Madrid, Spain. 2013. 11p.

CUNHA, A. J. P.; SOUZA, V. C. M., Lajes em Concreto Armado e Protendido, Eduff, 1998, 584p.

Eurocode 2, *Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium, 2004, 225 p.

FERREIRA, M. P. *Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Armaduras de Cisalhamento e Momentos Desbalanceados*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD – 007 A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2010. 275p.

GUANDALINI, S.; BURDET, O. L.; MUTTONI, A. *Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios*. ACI Structural Journal, n. 106-S10, Janeiro-Fevereiro, 2009.

HAWKINS, Honoring Neil M, Punching shear of structural concrete slabs. BULLETIN IFB N. 81, 2017, 378p.

LIMA, H. J. N. *Análise Experimental à Punção de Lajes Lisas tipo BubbleDeck*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM – 002 A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2015. 111p.

Model Code CEB-FIP 2010, *New Model Code*. 2010, 653p.

Muttoni A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. ACI Structural Journal, Excel sheet. USA, 2008.

TASSINARI, L. Poinçonnement asymétrique des dalles en béton armé avec armature de poinçonnement. Thèse EPFL. n. 5030. Laussane, Suíça, 2011. 197p.

TRAUTWEIN, L. M. *Punção em Cogumelo de Concreto Armado: Análise experimental e numérica*. Tese de Doutorado apresentado ao Departamento de Engenharia de Estrutura e Fundações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006. 278p.

SANTOS, E. V. *Análise da punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com sistema construtivo BUBBLEDECK*. MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2015. 111p.